



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Pedro Rafael Andrade Dias

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

Covilhã, fevereiro de 2016

Agradecimentos

Quero demonstrar o meu maior agradecimento ao Professor Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo, por toda a sua disponibilidade, ajuda e orientação que me concedeu ao longo destes meses de trabalho.

Agradeço a todos os Professores e Auxiliares que de uma forma ou de outra contribuíram para a minha formação como estudante e acima de tudo como pessoa.

Aos meus amigos, companheiros fieis nesta longa caminhada, a eles o meu muito obrigado! Quero agradecer a todos eles, aos amigos da minha terra natal e a todos aqueles que foi fazendo ao longo da minha vida pelos locais onde foi passando. Quero deixar um agradecimento especial ao pessoal do ano 2010/2011 de AERO, pelas muitas ajudas nos muitos trabalhos de grupo, nas explicações das matérias mais difíceis, pelas grandes noites de estudo e pelas grandes noites de copos que vivemos, e principalmente por estarem sempre presentes.

Família dos Andrades, muito obrigado pela grande união que nos caracteriza, pelas palavras e gestos que tem comigo, são elas que me fazem sentir e relembrar quais são as minhas origens. Aos meus primos, pelas brincadeiras e pela vossa amizade, aos meus tios pelo exemplo que são para mim e por todas as palavras sábias que me foram dizendo ao longo da minha vida e aos meus avós por estarem sempre presentes.

Um OBRIGADO, MUITO OBRIGADO aos meus pais, a ti Rosa e ao ti Carlos, pelo enorme sacrifício que fazem todos os dias para que eu consiga seguir os meus sonhos. Foi graças aos vossos raspanetes, conselhos e ensinamentos que tudo isto é possível, o meu MUITO OBRIGADO!!!

Quero agradecer ainda as pessoas e as gentes da Covilhã, pois foi “*Nesta cidade em plena serra, Perto do céu longe do mar*” que vivi momentos que nunca esquecerei e que levarei para o resto da minha vida.

Resumo

O presente trabalho teve como principal objetivo analisar e detetar de que forma a detonação ocorre, de que maneira se manifesta, qual ou quais as condições e os regimes de trabalho mais propícios para que este fenómeno de detonação aconteça.

Para a realização deste trabalho foram utilizados os motores presentes no Laboratório de Energética e Máquinas Térmicas do Departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, são eles o motor *OPEL ASTRA 1.4i*, o motor *LOMBARDINI LDW 502* e por fim o motor *HONDA GX 120*. Para levar a cabo a realização deste trabalho foi ainda utilizado um sensor de detonação *SKU 041848* e ainda o aparelho *PicoScope*, bem como o *software* informático o *PicoScope Automotive*.

O trabalho efetuado no motor *OPEL ASTRA 1.4i* e no motor no *LOMBARDINI LDW 502* consistiu em duas corridas ao longo do regime de operação destes motores. No motor *HONDA GX 120* a realização da parte experimental foi um pouco diferente, efetuou-se na mesma as duas corridas ao longo do regime de operação e forma descendentes, isto é, da rotação mais elevada para o seu ralenti, mas neste motor fez-se variar o ângulo *AI* (ângulo de ignição) dado que este estava ligado a uma centralina que possibilitava o controlo eletrónico de alguns parâmetros de funcionamento do motor, entre eles o *AI*.

Após a realização da parte experimental desta dissertação foram analisados os resultados obtidos pelo *PicoScope*. Tendo em conta o sinal das ondas captadas pelo *PicoScope* e a análise feita a esses sinais é possível estabelecer algumas comparações e verificar se existe detonação da mistura durante um determinado ciclo de funcionamento do motor. Pelos resultados obtidos foi possível verificar que, durante o funcionamento do motor *OPEL ASTRA 1.4i* e do motor *LOMBARDINI LDW 502* nos vários regimes de funcionamento dos motores não existe qualquer tipo de combustão anormal. No motor *HONDA GX 120* o caso é diferente, existe combustão anormal neste motor quando o ângulo de *AI* é muito elevado, acima de 50° de *AI*. À medida que os valores de ângulos de *AI* e as rotações vão aumentando, o fenómeno de detonação é mais evidente, sendo que com 70° e 75° de *AI* o motor acaba por se desligar.

Palavras-chave

Motor de Combustão Interna; Combustão Anormal; Sensor de Detonação; Avanço de Ignição; *PicoScope Automotive*.

Abstract

The present work had as main objective to analyze and detect how the detonation occurs, how it manifests itself, which or what conditions and working arrangements are more favourable to this detonation phenomenon happen.

For the accomplishment of this work were used engines from the Energy and Thermal Machines Laboratory of the Department of Electromechanical Engineering in the University of Beira Interior, they are the engine *OPEL ASTRA 1.4i*, the engine *LOMBARDINI LDW 502* and finally the engine *HONDA GX 120*. To carry out this work, was still used a knock sensor SKU 041848 as well as *PicoScope* device, and the *PicoScope Automotive* software.

The work done in the *OPEL ASTRA 1.4i* engine and in the engine *LOMBARDINI LDW 502* consisted of two races over these engines regime. On the engine *HONDA GX 120* the experimental part was a little different, with the same two races over the descending regimes, this is from the higher velocity until the engine reaches idle, but in this engine it was varied the IA angle (ignition angle), since it was linked to an electronic control unit (ECU) that allowed the electronic control of some engine operating parameters, including IA.

After completion of the experimental part of this thesis the results of *PicoScope* were analyzed. Given the *PicoScope* signals and the analysis of these signals, is has possible to make some comparisons and to check if the detonation of the mixture for a given engine operating cycle occurs. By the results it could be concluded that, during operation of the engines *OPEL ASTRA 1.4i* and *LOMBARDINI LDW 502* on various engine operations regimes, does not exist any type of abnormal combustion. For the engine *HONDA GX 120* the case is different, there is abnormal combustion on this engine when the IA is very high, above 50° . As the values of IA angles and the velocity increase, the detonation phenomenon is more evident, and with 70° and 75° of IA the engine eventually switch off.

Keywords

Internal Combustion Engine, Abnormal Combustion, Knock Sensor, Ignition Advance, *PicoScope Automotive*.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
1.4 Enquadramento Conceptual	3
2. Teoria Básica de Motores de Combustão Interna	5
2.1 Motor de Combustão Interna	6
2.2 Fases do Funcionamento do Motor	7
2.3 Combustão.....	13
2.4 Combustão Anormal.....	17
2.4.1 Pré-ignição (ignição à superfície)	18
2.4.2 Auto-ignição.....	19
2.4.3 Detonação (“knock”)	20
2.5 Sensores de Detonação.....	27
3. Experiência Laboratorial.....	33
3.1 Componentes Utilizados	33
3.1.1 Motores	33
3.1.2 Sensores	35
3.1.3 PicoScope Automotive.....	36
3.2 Métodos	37
3.2.1 Preparação	37
3.2.2 Aquisição de Dados	42
3.3 Descrição da Experiência	43
3.3.1 Problemas e Soluções Encontradas	53
4. Resultados	59

Detecção de Detonação em Motores de Pistão

4.1 OPEL ASTRA 1.4i.....	59
4.2 LOMBARDINI LDW 502.....	63
4.3 HONDA GX 120	67
4.3.1 Avanço de Ignição Fixo variando a Velocidade de Rotação.....	69
4.3.1 Velocidade de Rotação Fixa variando o Avanço de Ignição.....	91
5. Conclusões.....	101
5.1 Trabalhos Futuros	103
Bibliografia.....	105
Anexo A - Motores Utilizados	109
Anexo A1 - OPEL ASTRA 1.4i [26].....	109
Anexo A2 - LOMBARDINI LDW 502	111
Anexo A3 - HONDA GX 120.....	112
Anexo B - Mapa de injeção.....	113
Anexo C -	114
Anexo C1 - Tabela Ensaios Realizados no Motor OPEL ASTRA 1.4i	114
Anexo C2 - Tabela Ensaios Realizados no Motor LOMBARDINI LDW 502	115
Anexo C3 - Tabela Ensaios Realizados no Motor HONDA GX 120.....	116

Lista de Figuras

Figura 1 - Motores de combustão: esquerda - externa; direita - Interna [1].....	6
Figura 2 - Motor de combustão interna [5].....	7
Figura 3 - Motor a 2 tempos: 1 - tempo de compressão; 2 - tempo de potência [6].....	8
Figura 4 - Motor a 4 tempos [6].	9
Figura 5 - Diagrama p-V do ciclo ideal de Otto [7].	10
Figura 6 - Diagrama p-V do ciclo real de Otto [8].....	10
Figura 7 - Diagrama p-V do ciclo ideal de Diesel [7].	11
Figura 8 - Diagrama p-V do ciclo real de Diesel [8].....	12
Figura 9 - Diagrama de distribuição de um motor a 4 tempos [1].....	12
Figura 10 - Combustão anormal [1].....	18
Figura 11 - Aparecimento da pré-ignição [1].	19
Figura 12 - Pressão no cilindro vs. ângulo da cambota - (a) combustão normal, (b) combustão com ligeiro “knock”, (c) combustão com intenso “knock” [15].	20
Figura 13 - Dano no pistão devido a detonação [16].	21
Figura 14 - Aparecimento do “knock” [1].	23
Figura 15 - Knock (em motores de válvulas laterais) função do número de átomos de carbono por molécula [1].	23
Figura 16 - Ocorrência do “knock” função da temperatura e riqueza da mistura [1].	24
Figura 17 - Câmara de combustão hemisférica [21].	26
Figura 18 - Sensor de detonação [24].	28
Figura 19 - Sinal de um sensor de detonação - (1) sem detonação, (2) com detonação [26]. .	29
Figura 20 - Sensor de detonação magnetorestritivo [27].	29
Figura 21 - Acelerómetro piezoelétrico [27].	30
Figura 22 - Sensor de detonação piezo-cerâmico [27].	31
Figura 23 - Banco de ensaios OPEL ASTRA 1.4i.	33

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Figura 24 - Banco de ensaios LOMBARDINI LDW 502.	34
Figura 25 - Banco de ensaios HONDA GX 120.	34
Figura 26 - Sensor de detonação SKU 041848.	35
Figura 27 - Sensor VRS.	36
Figura 28 - PicoScope Automotive.	37
Figura 29 - Instalação sensor de detonação no motor OPEL.	38
Figura 30 - Instalação sensor VRS no motor OPEL.	39
Figura 31 - Instalação sensor de detonação no motor LOMBARDINI.	39
Figura 32 - Instalação sensor VRS no motor LOMBARDINI.	40
Figura 33 - Instalação sensor de detonação no motor HONDA.	41
Figura 34 - Sensor de Hall.	41
Figura 35 - Menus PicoScope Automotive.	42
Figura 36 - PicoScope escalas usadas.	43
Figura 37 - Banco de ensaios OPEL ASTRA 1.4i.	44
Figura 38 - Sinal captado pelo PicoScope.	45
Figura 39 - Banco de ensaios motor LOMBARDINI LDW 502.	47
Figura 40 - Sinais captados pelo PicoScope.	48
Figura 41 - Procedimento para a troca de tipo de ignição.	49
Figura 42 - Acerto da ignição.	49
Figura 43 - Banco de ensaios motor HONDA GX 120.	50
Figura 44 - Sinais captados pelo PicoScope.	51
Figura 45 - Legenda do funcionamento de um ciclo no motor HONDA.	52
Figura 46 - Sinal captado pelo PicoScope sensor de detonação.	53
Figura 47 - Sinal captado pelo PicoScope sensor de detonação mais VRS.	54
Figura 48 - Problemas e soluções encontradas motor HONDA GX 120.	55
Figura 49 - Posicionamento do sensor de Hall antes e depois dos ajustes no motor HONDA. ...	56
Figura 50 - Motor HONDA GX 120 aberto.	57
Figura 51 - Legenda de um ciclo de funcionamento do motor OPEL.	60

Figura 52 - Ensaios no motor OPEL.	61
Figura 53 - Gráfico dos ensaios realizados no motor OPEL.	62
Figura 54 - Legenda de um ciclo de funcionamento do motor LOMBARDINI.....	63
Figura 55 - Ensaios no motor LOMBARDINI.....	65
Figura 56 - Gráfico dos ensaios realizados no motor LOMBARDINI.	66
Figura 57 - Posicionamento do pistão em relação ao ângulo de AI [11].....	67
Figura 58 - Legenda de um ciclo de funcionamento do motor HONDA.	68
Figura 59 - Ensaios no motor HONDA com AI de 75°.	70
Figura 60 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 75°.	71
Figura 61 - Ensaios no motor HONDA com AI de 70°.	72
Figura 62 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 70°.	73
Figura 63 - Ensaios no motor HONDA com AI de 60°.	74
Figura 64 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 60°.	76
Figura 65 - Ensaios no motor HONDA com AI de 50°.	77
Figura 66 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 50°.	79
Figura 67 - Ensaios no motor HONDA com AI de 40°.	80
Figura 68 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 40°.	82
Figura 69 - Ensaios no motor HONDA com AI de 30°.	83
Figura 70 - Gráficos dos ensaios no motor HONDA com AI de 30°.	85
Figura 71 - Ensaios no motor HONDA com 20° de AI.	86
Figura 72 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com 20° de AI.	88
Figura 73 - Ensaios no motor HONDA com 10° de AI.	89
Figura 74 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com 10° de AI.	90
Figura 75 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 700 \text{ rpm}$	92
Figura 76 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a $\approx 700 \text{ rpm}$	93
Figura 77 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 1400 \text{ rpm}$	94
Figura 78 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a $\approx 1400 \text{ rpm}$	95
Figura 79 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 2300 \text{ rpm}$	96

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Figura 80 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a $\approx 2300 \text{ rpm}$	97
Figura 81 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 2750 \text{ rpm}$	98
Figura 82 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a $\approx 2750 \text{ rpm}$	99

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades dos combustíveis.	17
Tabela 2 - Fatores que influenciam a detonação.	27
Tabela 3 - Correspondência dos AI eletrônico com os AI eletromagnéticos.	51
Tabela 4 - Ensaios no motor OPEL.	62
Tabela 5 - Ensaios no motor LOMBARDINI.	66
Tabela 6 - Ensaios no motor HONDA com AI de 75°.	70
Tabela 7 - Ensaios no motor HONDA com AI de 70°.	72
Tabela 8 - Ensaios no motor HONDA com AI de 60°.	75
Tabela 9 - Ensaios no motor HONDA com AI de 50°.	78
Tabela 10 - Ensaios no motor HONDA com AI de 40°.	81
Tabela 11 - Ensaios no motor HONDA com AI de 30°.	84
Tabela 12 - Ensaios no motor HONDA com 20° de AI.	87
Tabela 13 - Ensaios no motor HONDA com 10° de AI.	90
Tabela 14 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 700 \text{ rpm}$	93
Tabela 15 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 1400 \text{ rpm}$	95
Tabela 16 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 2300 \text{ rpm}$	97
Tabela 17 - Ensaios no motor HONDA a $\approx 2750 \text{ rpm}$	99
Tabela 18 - Características do motor OPEL ASTRA 1.4i.	109
Tabela 19 - Características do motor LOMBARDINI LDW 502.	111
Tabela 20 - Características do motor HONDA GX 120.	112
Tabela 21 - Mapa de injeção do motor HONDA GX 120.	113
Tabela 22 - Tabela dos ensaios realizados no Motor OPEL ASTRA 1.4i.	114
Tabela 23 - Tabela dos ensaios realizados no motor LOMBARDINI LDW 502.	115
Tabela 24 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 75°.	116
Tabela 25 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 70°.	117

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Tabela 26 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 60°.	118
Tabela 27 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 50°.	119
Tabela 28 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 40°.	120
Tabela 29 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 30°.	121
Tabela 30 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 20°.	122
Tabela 31 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 10°.	123
Tabela 32 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a $\approx 700\text{ rpm}$	124
Tabela 33 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a $\approx 1400\text{ rpm}$	124
Tabela 34 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a $\approx 2300\text{ rpm}$	125
Tabela 35 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a $\approx 2750\text{ rpm}$	125

Lista de Acrónimos

AAA	Avanço à abertura da válvula de admissão
AAE	Avanço à abertura da válvula de escape
AC	Corrente alternada
AI	Avanço de ignição
AVA	Abertura da válvula de admissão
AVE	Abertura da válvula de escape
DEM	Departamento de Engenharia Eletromecânica
ECU	Electronic control unit
EGR	Recirculação de gases de escape
FJD	Fim da janela de combustão
FVA	Fecho da válvula de admissão
FVE	Fecho da válvula de escape
IA	Ignition angle
IJD	Início da janela de combustão
IO	Índice octano do combustível
LEMT	Laboratório de Energética e Máquina Térmicas
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
RFA	Atraso ao fecho da válvula de admissão
RFE	Atraso ao fecho da válvula de escape
<i>rpm</i>	Rotação por minuto
UBI	Universidade da Beira Interior
UCE	Unidade de controlo eletrónico
VRS	Sensor de relutância variável

Nomenclatura

p	Pressão [Pa]
V	Volume [m^3]
A/F	Razão da massa de ar com a massa de combustível $[-]$
$(A/F)_{esteq.}$	Razão estequiométrica ar/combustível $[-]$
\dot{m}_{ar}	Caudal mássico do ar [kg/s]
\dot{m}_{fuel}	Caudal mássico do combustível [kg/s]
m_{ar}	Caudal do ar [kg]
m_{fuel}	Caudal de combustível [kg]
M_{fuel}	Massa molar de combustível [g/mol]
M_{O_2}	Massa molar de oxigénio [g/mol]
M_{N_2}	Massa molar de azoto [g/mol]
ϕ	Razão de equivalência ar/combustível $[-]$
λ	Coeficiente de excesso ar/combustível $[-]$
f	Frequência [Hz]
t	Tempo [s]
w	Frequência angular [rad/s]

1. Introdução

1.1 Motivação

As máquinas térmicas estão presentes em cada momento no quotidiano da humanidade, estas fazem com que seja possível conseguir produzir bens e usufruir deles. Estas máquinas são mecanismos fascinantes, elas permitem que civilizações se desenvolvam e fornecem os instrumentos necessários para que estas possam melhorar a sua qualidade de vida.

Uma das máquinas que mais contribui para a melhoria da qualidade de vida foi o motor de combustão interna, tendo sido criado nos meados do séc. XIX. Esta criação foi uma das descobertas que mais revolucionou o mundo, tendo um grande impacto na sociedade e na vida da sociedade, impacto esse que se estende até aos dias de hoje [1]. O motor de combustão interna é uma máquina térmica dotada de uma grande versatilidade, podendo ser utilizada tanto em automóveis, como motos, camiões, locomotivas, navios, aviões, bombas de água, máquinas de corta relva e motosserras, entre muitas outras aplicações.

Apesar do motor de combustão interna já existir desde os anos 50 do séc. XIX, ao longo dos anos tem-se vindo a melhorar e a aperfeiçoar o funcionamento deste tipo de motores [2]. A procura de um motor mais eficiente e de mecanismos que permitem aperfeiçoar o seu funcionamento de uma forma rápida e mais económica tem levado as marcas produtoras de motores e a comunidade científica a realizar cada vez mais estudos e mais ensaios laboratoriais sobre os diferentes tipos de motores e diferentes regimes de funcionamento.

A introdução de motores de combustão interna em veículos do quotidiano foi um grande marco na civilização mundial, levando à criação de cada vez mais veículos sendo com isto mais fácil transportar e movimentar pessoas e bens. Contudo, a grande utilização de veículos terrestres, náuticos e aéreos tem causado um grande impacto no meio ambiente.

Existe atualmente uma grande preocupação com as emissões poluentes emitidas pelos veículos motorizados para o ambiente, isto leva a que seja necessário tornar este tipo de veículos mais eficientes e menos poluentes de modo a que se consiga reduzir o impacto que as suas emissões poluentes provocam no meio ambiente.

A grande preocupação com o meio ambiente levou a que as empresas fabricantes de motores reunissem esforços de maneira a construírem motores mais eficientes. Para tal ser possível foram criados variados tipos de sensores que verificam, e alguns deles retificam, o funcionamento do motor, isto é, levaram à criação de sensores com mecanismos para averiguar

se o funcionamento do motor está dentro dos parâmetros para a execução de uma determinada função e caso estes não estejam é corrigido o seu funcionamento para os parâmetros programados e idealizados para a realização da atividade. Com o recurso aos sensores presentes num motor é possível garantir um bom funcionamento do motor e retirar do motor o melhor rendimento possível.

Este fascínio de observar e tentar perceber, o como e o porquê de as coisas acontecerem, conduziram-me ao curso de Engenharia Aeronáutica. Ao longo do Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica existiram disciplinas que me deram um gosto especial, são elas a disciplina de Propulsão de Aeronaves I e a disciplina de Vibrações e Ruído, tendo em conta estes dois pontos de interesse perguntei então ao meu Orientador, Professor Doutor Francisco Brójo, se seria possível de alguma maneira ter um tema de dissertação onde estas duas disciplinas se interligavam, foi então que ele me sugeriu o tema “Deteção de Detonação em Motores de Pistão”, e eu aceitei.

1.2 Objetivos

Engenharia é “a aplicação dos princípios científicos à exploração dos recursos naturais, ao projeto e à construção de comodidades e ao fornecimento de utilidades” [3]. Tendo em conta a definição acima descrita, podemos afirmar que o estudo de engenharia é criar a habilidade técnica e científica que permite observar um determinado acontecimento, analisá-lo, compreendê-lo para seja possível antecipá-lo ou prever as consequências que este acontecimento possa vir a provocar.

A principal finalidade desta dissertação é detetar o aparecimento da detonação, de maneira a prevenir o seu aparecimento e garantir que o motor em estudo tenha um funcionamento mais eficiente. Para isso pretendeu-se observar e analisar de que forma a detonação ocorre, de que maneira esta se manifesta, qual o regime de trabalho que faz com que esta aconteça e quais as condições que levam a que ocorra.

1.3 Estrutura da Dissertação

Nesta secção inicial é feita uma introdução ao tema central da dissertação, onde é descrito qual a motivação que permitiu levar a cabo esta dissertação, quais os objetivos que se pretende

atingir com a realização desta dissertação, e por fim é feito também um enquadramento conceptual ao tema.

Na segunda secção, são apresentados alguns conceitos teóricos importantes sobre os motores de combustão interna, bem como as diferentes fases de funcionamento de um motor, destacando principalmente a parte da combustão, mais concretamente a combustão anormal que pode acontecer durante o funcionamento de um motor. No final desta secção são apresentados os sensores de vibração referindo qual a sua importância e a sua forma de utilização.

Na terceira secção é descrito como foi realizada a parte experimental inerente a esta dissertação. Inicialmente são apresentados os materiais que foram utilizados, bem como as ferramentas para levar a cabo a realização da parte experimental. Posteriormente são apresentados os métodos de preparação para a realização dos ensaios práticos, para a aquisição de dados inerentes aos ensaios, e por fim são apresentados os problemas encontrados ao longo da realização da parte experimental e quais as soluções que foram encontradas para os problemas referidos.

Na quarta secção estão apresentados os resultados obtidos na parte experimental. Nesta secção são exibidos os resultados, sendo estes analisados e discutidos ao longo do capítulo.

Na quinta e última secção desta dissertação são apresentadas as conclusões retiradas da realização da atividade experimental, assim como também são apresentadas algumas sugestões para possíveis trabalhos futuros a serem realizados.

1.4 Enquadramento Conceptual

Um motor de combustão interna passou a fazer parte do quotidiano, é cada vez mais comum lidar ou usar este tipo de máquina térmica na vida do dia-a-dia. Esta máquina funciona segundo o princípio de pistão alternativo, isto é, dentro de um cilindro é deslocado um pistão de forma cíclica da parte superior do cilindro para a parte inferior deste, e assim sucessivamente. O movimento do pistão é o responsável pela transmissão da energia necessária para que o veículo ou qualquer tipo de máquina de combustão interna consiga funcionar.

O funcionamento da máquina de combustão interna está dividido em quatro fases, a admissão, a compressão, a expansão e o escape. São estas as fases que caracterizam o funcionamento de um motor.

Uma das etapas mais importantes e fascinantes do funcionamento de um motor de combustão interna é o processo de combustão. Este processo acontece no final do processo de compressão

Detecção de Detonação em Motores de Pistão

e início da fase de expansão. A combustão ocorre quando a mistura de combustível com o oxidante explode e se incendeia dentro do cilindro do motor, este é o momento em que o ciclo de funcionamento do motor atinge a sua temperatura e pressão mais elevada.

Graças ao processo de combustão é possível retirar o trabalho mecânico pretendido com a utilização de um determinado do motor, fazendo deste um dos processos mais importantes no funcionamento de um motor de combustão interna.

O rendimento do processo de combustão vai variando muito ao longo da vida útil do motor. Varia com os anos de trabalho do motor, com o estado de conservação deste, com as rotações a que o motor se encontra a funcionar, o tipo de combustível utilizado, o tipo de operação que o motor está a realizar, entre muitos outros fatores.

Para garantir que o motor se encontra a funcionar no regime pretendido sem causar danos de maior, são muitas vezes utilizados nestes sensores. Os sensores foram introduzidos nos motores de combustão interna ao longo dos anos para que seja possível monitorizar de maneira mais segura e mais específica o funcionamento de uma determinada parte ou de um determinado parâmetro de funcionamento do motor.

Os sensores permitem corrigir e limitar o funcionamento de um motor durante a sua utilização. Eles permitem fazer a correção do funcionamento através da análise dos dados recolhidos, ou evitar que certos fenómenos aconteçam, conseguindo desta maneira melhorar o desempenho do motor, aumentando o seu rendimento.

Tal como veremos mais à frente nesta dissertação, a detonação é um fenómeno de uma combustão anormal que pode causar danos ao motor, alguns deles graves. Uma das maneiras de compreender e analisar este tipo de fenómeno é o recurso a sensores de detonação. Este tipo de sensor capta as vibrações geradas no decorrer do funcionamento do motor, sendo possível verificar se existe alguma alteração anormal quando o fenómeno de combustão acontece. Através da análise dos dados recolhidos da vibração do motor em funcionamento é possível observar e compreender o comportamento da combustão num determinado motor de combustão interna e desta maneira desenvolver mecanismos para evitar que estes fenómenos aconteçam, visto que a combustão anormal prejudicam o bom funcionamento do motor de combustão interna.

2. Teoria Básica de Motores de Combustão Interna

Ao longo do século passado o motor de combustão interna tornou-se uma das maneiras mais versáteis de produção de energia mecânica. É graças ao motor de combustão interna que se tornou possível viajar em meios de transporte como por exemplo o automóvel, comboio, barco, veículos militares e até o avião. O motor de combustão interna tem evoluindo ao longo do tempo, sofrendo alterações e melhoramentos constantes.

A origem deste tipo de motor de combustão interna começou em 1860 quando Etienne Lenoir (1822-1900) registou a primeira patente relativa a um “motor de explosão”, a dois tempos, que trabalhava com gás de iluminação. Depois de Lenoir, o francês Alphonse Beau de Rochas (1815-1893) em 1862 publicou alguns estudos teóricos e desenvolveu os princípios termodinâmicos daquele que viria a ser o ciclo de funcionamento de um motor a quatro tempos. No ano de 1867 Nikolaus Otto (1832-1891) e Eugen Langen (1833-1895) baseados nos estudos de Beau de Rochas, desenvolveram um motor que funcionava com ciclos de quatro tempos [4].

Decorria o ano de 1892 quando o engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913) apresentou uma nova patente de outro motor de combustão interna. Foi Diesel o primeiro a ter em consideração o aquecimento produzido pela compressão do ar para inflamar o combustível [4]. Graças ao motor desenvolvido e criado por Diesel é possível ter um motor com uma grande taxa de compressão sem que ocorra detonação ou explosão espontânea da mistura presente no interior do cilindro.

As principais diferenças entre o funcionamento do motor segundo o ciclo de Diesel e o ciclo de Otto são:

- Os motores que funcionam segundo o ciclo de Otto utilizam combustíveis de elevada volatilidade, como é o caso da gasolina e do álcool; por sua vez os motores de ciclo de Diesel utilizam como combustíveis de baixa volatilidade e maior dificuldade, tais como o gasóleo e o óleo.
- Nos motores de combustão interna que funcionam segundo o ciclo de Otto para ocorrer a ignição do combustível é necessária uma faísca para dar início à combustão da mistura, faísca essa que é acionada por um sistema elétrico auxiliar; por outro lado, nos motores de combustão interna que seguem como funcionamento o ciclo de Diesel esta ignição é obtida através da compressão do ar que leva a um consequente aumento da temperatura fazendo com que ignição ocorra sem necessidade de uma faísca.

2.1 Motor de Combustão Interna

Um motor de combustão interna utiliza os produtos da combustão, produzidos dentro do próprio cilindro do motor como fluido de trabalho, ao contrário de um motor de combustão externa (ver Figura 1 - esquerda), em que os produtos da combustão transmitem calor a outro fluido que serve de veículo de trabalho. Analisando os dois diferentes tipos de ciclo, é possível verificar que se obtém um maior rendimento dos motores de combustão interna (ver Figura 1 - direita) do que dos motores de combustão externa, pois este tipo de motores possuem mecanismos mais simples, sendo desta maneira motores mais proveitosos, com menos perdas mecânicas e ao mesmo tempo são máquinas mais leves sem componentes externos necessários para a realização da combustão.

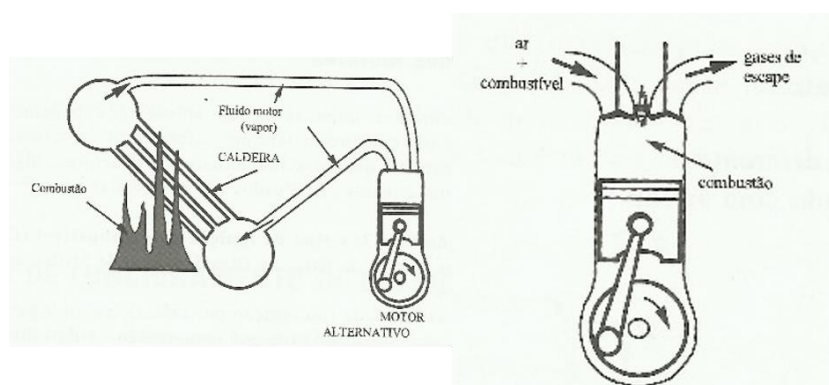


Figura 1 - Motores de combustão: esquerda - externa; direita - Interna [1].

Todos os motores de combustão interna têm o mesmo modo de funcionamento, exceção feita ao motor criado por Félix Wankel. O motor de combustão interna é constituído por partes móveis, como é o caso da biela, da cambota, do pistão/êmbolo, das válvulas de admissão e de escape, das cames e da árvore de cames; e por partes fixas, como o bloco do motor, o cárter e a cabeça do motor (ver Figura 2).

Os motores de combustão interna funcionam segundo o princípio do movimento alternado do êmbolo ou pistão, isto é, o movimento que é efetuado pelo êmbolo dentro do cilindro é transmitido à cambota através de uma biela, este movimento faz com que exista a transferência de energia necessária para que o veículo ou qualquer máquina consiga funcionar. Para existir esta conversão de energia é necessário que ocorram 4 fases, são elas: a admissão, a compressão, a expansão e o escape.

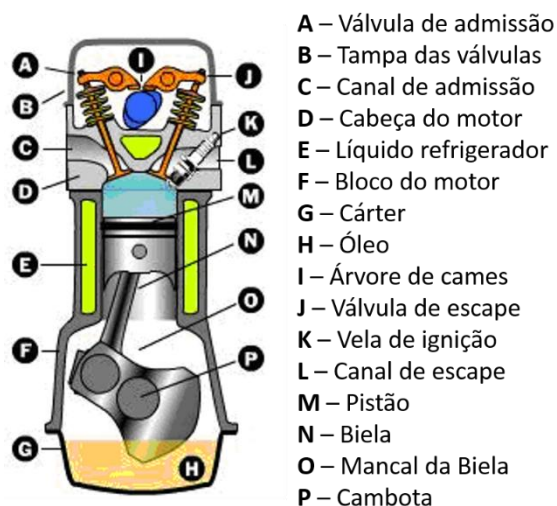


Figura 2 - Motor de combustão interna [5].

2.2 Fases do Funcionamento do Motor

O funcionamento do motor de combustão interna está dividido em tempos ou cursos. A divisão relativa ao funcionamento do motor de combustão é feita em dois tipos: motores de combustão de 2 tempos e motores de combustão de 4 tempos. Um tempo ou curso é o deslocamento que o pistão faz desde o ponto morto superior até ao ponto morto inferior, ou ao contrário do ponto morto inferior até ao ponto morto superior.

No funcionamento de um motor de 2 tempos temos [6]:

- No primeiro tempo temos o tempo de compressão, em que o êmbolo se desloca desde o ponto morto inferior (PMI) até ao ponto morto superior (PMS) comprimindo a mistura que se encontra dentro do cilindro. A medida que o êmbolo sobe ao longo do cilindro é aberta a janela de admissão, onde a mistura é aspirada para a parte inferior do cilindro (cárter), isto acontece devido a diferença de pressão que existe do exterior para o interior do cárter. Habitualmente neste tipo de motores, o combustível e o ar são misturados antes de entrar para a parte inferior do cilindro, a este procedimento chama-se de pré-mistura. Contudo, caso não tenha ocorrida a pré-mistura o combustível pode ser injetado para dentro do cilindro quando o pistão está próximo do PMS levando a que ocorra a explosão. Durante este tempo de compressão estão presentes duas das fases do funcionamento do motor a 2 tempos, a fase compressão e a fase da admissão.

- No segundo tempo temos o curso de expansão, em que o êmbolo se move para o PMI, isto devido ao aumento da temperatura e da pressão causado pela explosão da mistura dentro do cilindro. Dentro do cilindro existem passagens, chamadas de janelas, que são abertas com o movimento do pistão dentro do cilindro. À medida que o pistão desce, a janela de escape é aberta, o que faz com que a mistura queimada que se encontra dentro do cilindro consiga escapar por esta janela. O movimento descendente do pistão dentro do cilindro continua e abre a janela de transferência, que permite que a mistura que tinha sido admitida para a parte inferior do cilindro (cárter) no tempo de compressão, passe agora para o interior do cilindro. Durante este curso estão presentes a fase de escape da mistura e a fase de escape da mistura. O processo é reiniciado, novamente com o curso de compressão.

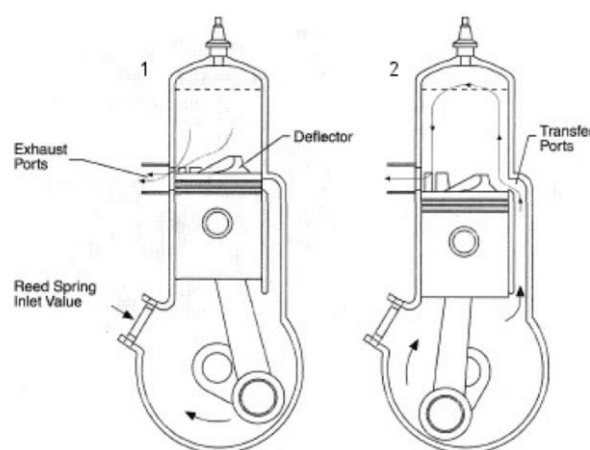


Figura 3 - Motor a 2 tempos: 1 - tempo de compressão; 2 - tempo de potência [6].

O funcionamento de um motor de 4 tempos (ver Figura 4) é um pouco diferente do de 2 tempos, enquanto no motor de 2 tempos temos duas fases por cada tempo, num motor de 4 tempos temos uma fase por cada tempo. Admissão e o escape da mistura do cilindro são controlados por válvulas e os motores mais recentes podem ter mais do que uma válvula, quer para realizar a admissão da mistura quer para o escape desta. As fases de funcionamento de um motor a 4 tempos são as seguintes [6]:

- A primeira fase é a admissão. Esta fase inicia-se quando o êmbolo está no PMS e a válvula de admissão é aberta permitindo que a mistura fresca entre para o cilindro devido à diferença de pressões que é criada pelo movimento descendente do êmbolo ao longo do cilindro. Este movimento cria um efeito de sucção da mistura que está na parte exterior para a parte interior do cilindro, terminando assim a fase de admissão.
- A segunda fase é a de compressão. Nesta fase, as válvulas estão fechadas e o processo de compressão torna-se semelhante ao de um motor de 2 tempos. A carga

é comprimida pelo movimento ascendente do pistão no cilindro e quando este se encontra perto do seu PMS ocorre a explosão, elevando assim os valores da temperatura e da pressão.

- A terceira fase ocorre logo em seguida à combustão, que é a expansão ou também chamada a fase de produção de energia. Ocorrida a explosão, o êmbolo é forçado a descer para o PMI, devido ao aumento de pressão e de temperatura.
- A quarta e última fase é chamada de escape, e como o próprio nome indica é quando se dá o escape da mistura queimada do cilindro do motor. A válvula de escape é aberta e com o movimento ascendente do pistão e os gases são expulsos de dentro do cilindro. Concluída a fase de escape está concluído o ciclo de funcionamento de um motor. O ciclo é reiniciado novamente com a fase de admissão.

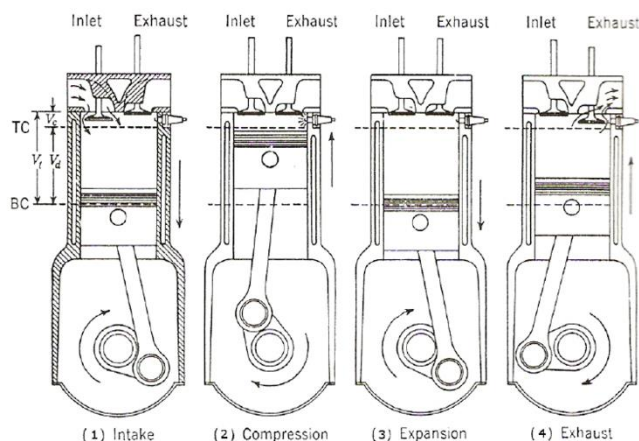


Figura 4 - Motor a 4 tempos [6].

O funcionamento de um motor de combustão interna pode também ser representado num diagrama, o diagrama de Clapeyron relaciona a pressão com o volume durante um ciclo de funcionamento.

Na Figuras 5 e 6, estão representados os ciclos para um motor de combustão que segue o ciclo de Otto. Na Figura 5 está representado um diagrama p-V para um ciclo ideal de Otto com um gás perfeito (ciclo teórico), na segunda está representado um diagrama p-V para um ciclo de Otto real, isto é, o ciclo que realmente acontece durante o funcionamento de um motor de combustão.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

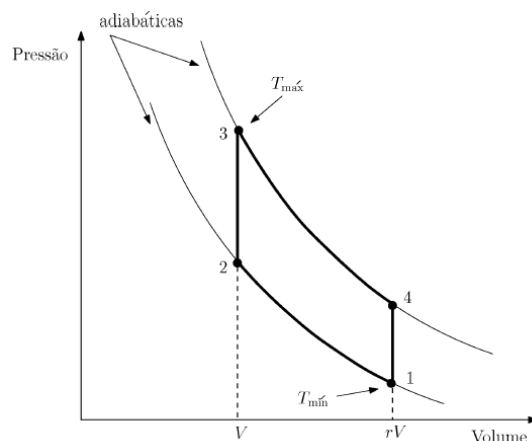


Figura 5 - Diagrama p-V do ciclo ideal de Otto [7].

Da Figura 5 podemos retirar as seguintes conclusões:

- O processo 1-2 é uma compressão isentrópica
- O processo 2-3 é uma adição de calor a volume constante
- O processo 3-4 é uma expansão isentrópica
- O processo 4-1 é uma rejeição de calor a volume constante

Este é o modelo ideal para o funcionamento de um motor a gasolina, pois um motor com este combustível segue o princípio de funcionamento deste ciclo teórico. Contudo, quando este tipo de motor está em funcionamento existem perdas de calor, a combustão não se dá de forma instantânea e os tempos de abertura e fecho das válvulas de admissão e de escape não são instantâneos e no ponto morto superior ou inferior. Deste modo, o diagrama p-V apresentado na Figura 6 representa o ciclo real de um motor de combustão que segue o funcionamento real do ciclo de Otto.

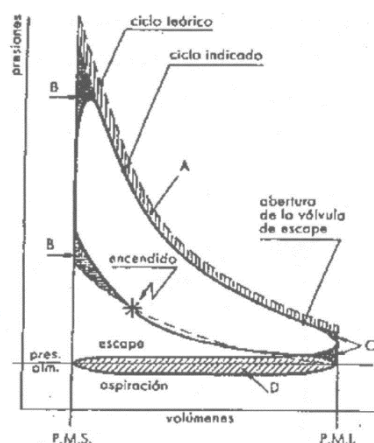


Figura 6 - Diagrama p - V do ciclo real de Otto [8].

O funcionamento de um motor de combustão interna que funciona segundo o ciclo de Diesel tem os diagramas apresentados nas Figuras 7 e 8.

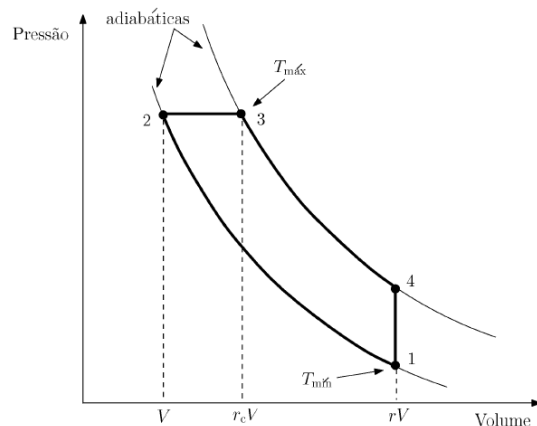


Figura 7 - Diagrama p-V do ciclo ideal de Diesel [7].

Na Figura 7 temos o diagrama p-V de um ciclo ideal de Diesel. Deste diagrama podemos retirar as seguintes conclusões:

- O processo 1-2 é uma compressão isentrópica
- O processo 2-3 é uma adição de calor a pressão constante
- O processo 3-4 é uma expansão isentrópica
- O processo 4-1 é uma rejeição de calor a volume constante

Tal como o ciclo de Otto (gasolina), este ciclo sofre modificações durante o seu funcionamento pelas mesmas razões que o motor de gasolina. No motor a gasóleo (Diesel) durante o seu funcionamento existem perdas de calor, a combustão não se dá de forma instantânea e os tempos de abertura e fecho das válvulas de admissão e de escape não são instantâneos nem no ponto morto superior ou inferior. Devido a todos estes fatores o diagrama p-V de um motor de combustão que segue o funcionamento real do ciclo de Diesel tem o aspeto apresentado na Figura 8.

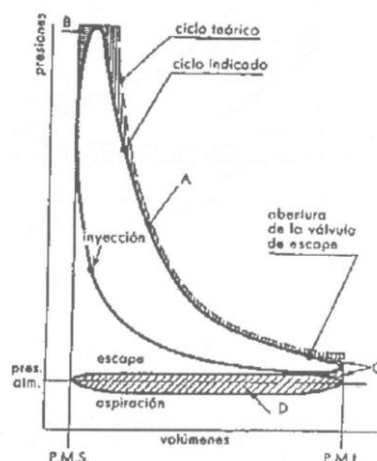


Figura 8 - Diagrama p-V do ciclo real de Diesel [8].

Outra das formas de representar o funcionamento de um motor de combustão interna é recorrendo a um diagrama de distribuição de um motor de combustão interna. Este tipo de diagramas pode ser realizado para a motores de combustão interna a dois tempos ou a quatro tempos. Neste tipo de diagramas são apresentadas as posições aquando a abertura e fecho das válvulas do motor, e é identificado também o momento em que ocorre a ignição da mistura presente no interior do cilindro do motor. Ao contrário do referido nos ciclos teóricos a abertura e fecho das válvulas, bem como os momentos em que se dá a ignição não ocorrem no PMS ou no PMI do motor, mas ligeiramente afastados deste, como representado na Figura 9.



Figura 9 - Diagrama de distribuição de um motor a 4 tempos [1].

A abertura da válvula de admissão é feita antes do pistão se encontrar no PMS, designando-se este avanço como avanço à abertura da válvula de admissão (AAA). O encerramento desta válvula é efetuado pouco depois do êmbolo passar pelo PMI, este ligeiro atraso permite ao

cilindro absorver o máximo da mistura para o seu interior, chamando-se atraso ao fecho da válvula de admissão (RFA).

A combustão da mistura deveria acontecer a volume constante no PMS do motor, porém na prática a ignição inicia-se antes do PMS. Este avanço, avanço da ignição (AI), serve para que a combustão da mistura aconteça de modo a que a pressão máxima do ciclo ocorra ligeiramente depois do PMS, de maneira a aumentar a componente de pressão útil exercida no êmbolo para este descer.

Da mesma forma, como acontece na admissão, existe um avanço na abertura da válvula de escape que é designado por avanço à abertura da válvula de escape (AAE). Este avanço à abertura da válvula de escape dá-se um pouco antes do PMI, isto acontece de maneira a que se consiga escoar os gases de escape de uma forma mais rápida, aliviando assim a pressão sentida dentro do cilindro do motor e facilitando a subida do êmbolo. De maneira a que exista uma saída completa dos gases de escape, a válvula de escape sofre um ligeiro atraso, isto é, em vez desta fechar no PMS, ela fecha um pouco depois do PMS já no período em que se começa a fazer a admissão para dentro do cilindro, a este atraso é chamado atraso ao fecho da válvula de escape (RFE).

2.3 Combustão

O trabalho extraído pelo funcionamento do motor de combustão interna é obtido pelo processo de combustão. O processo de combustão ocorre quando a mistura explode e entra em combustão, este processo ocorre próximo do final do tempo de compressão e durante a primeira parte do período de expansão. Nos motores a gasolina, este processo inicia-se através de uma faísca acionada eletronicamente no topo da câmara de combustão, levando a que a mistura se incendeie. Por sua vez, no caso dos motores a gasóleo, a combustão ocorre devido aos elevados valores de pressão e temperatura que se fazem sentir dentro da câmara de combustão, fazendo com que a mistura se incendeie, aumentando desta maneira a temperatura e a pressão.

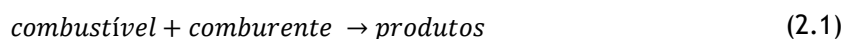
A combustão trata-se de um processo químico exotérmico onde dois elementos diferentes, o combustível e o comburente, que espontaneamente ou com introdução de um fator externo, como por exemplo uma faísca, entram em combustão. Este processo inicia-se antes do PMS para que se consiga obter um valor de binário máximo, o processo de combustão dá-se a partir do ponto de inflamação, onde a frente de chama avança e se desloca no sentido da mistura que ainda não está queimada até se extinguir quando encontra uma parede (a parte superior do pistão) [8].

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Durante o processo de combustão, a composição da mistura utilizada varia ao longo do tempo. As espécies químicas constituintes da mistura no início deste processo chamam-se reagentes, por outro lado, as espécies químicas constituintes no final do processo de combustão são designadas por produtos. Ao longo deste processo químico, o número de moles de cada espécie mantém-se inalterado.

Os reagentes utilizados num processo de combustão são o combustível e o comburente. Como combustível o mais comum a utilizar num processo de combustão é o hidrocarboneto, que tem a seguinte fórmula química, C_xH_y ; como comburente ou oxidante o mais frequentemente é o ar, composto por 21% de O_2 , 78% de N_2 e 1% de outros compostos como o CO_2 , H_2O e outros gases raros.

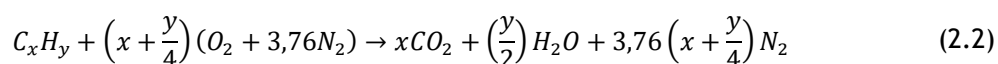
Desta forma podemos afirmar que o processo de combustão pode ser descrito da seguinte maneira [9]:



Dependendo de como se dá a reação entre o combustível e o comburente, podemos classificar a combustão como sendo uma combustão completa ou uma combustão incompleta. Uma combustão completa ocorre quando são gastos todos os elementos disponibilizados pelo combustível por parte do comburente, isto é, o carbono, hidrogénio e outros elementos que estão presentes no combustível ao reagirem com o oxigénio e com o azoto resultam em produtos de dióxido de carbono, vapor de água, óxidos de enxofre e de azoto. No caso de uma combustão incompleta os elementos de carbono reagem parcialmente ou nem reagem com os elementos de oxigénio, produzindo assim dióxido de carbono e monóxido de carbono, em certos casos esta combustão incompleta leva ainda a presenças de combustível não queimado nos gases de escape do motor.

Uma reação entre o combustível e o oxidante diz-se uma reação estequiométrica, quando a quantidade de oxidante nessa mistura é a necessária para que ocorra a combustão total da quantidade de combustível disponível na mistura, isto é, para um hidrocarboneto todo o carbono se transforma em CO_2 e todo o hidrogénio em H_2O , não existindo a formação de óxidos de azoto.

A reação estequiométrica pode escrever-se como:



Sabendo a composição do combustível pode-se chegar à quantidade mínima necessária de ar para a combustão se realizar, esta quantidade de ar é dada por um balanço químico. A

quantidade de ar é um parâmetro muito importante no rendimento da combustão, pois quando não existe ar em quantidades apropriadas para o combustível disponível faz com que exista uma combustão incompleta, isto é, o rendimento máximo da combustão não é atingido. Quando existe uma combustão incompleta o potencial do combustível não é atingido e este tipo de combustão gera gases poluentes, tais como o monóxido de carbono. Por outro lado, a quantidade de ar em excesso na mistura faz com que exista uma redução da temperatura dos gases da combustão, potenciando assim o aparecimento de compostos, tais como o CO nos gases de escape.

De maneira a que o motor funcione é preciso uma certa quantidade de ar e de combustível, como visto anteriormente. Uma maneira de sabermos esta relação de ar/combustível é fazendo a razão da massa de ar com a massa de combustível, como descrito na equação (2.3):

$$\frac{A}{F} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (2.3)$$

A razão estequiométrica ar/combustível para um dado hidrocarboneto é dada por:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{esteq} = \left(\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_{esteq} = \frac{\left(x + \frac{y}{4}\right)(M_{O_2} + 3,76M_{N_2})}{M_{fuel}} = 4,76 \left(x + \frac{y}{4}\right) \frac{M_{ar}}{M_{fuel}} \quad (2.4)$$

Durante o funcionamento de um motor, a combustão completa estequiométrica não ocorre dando lugar a formação de espécies químicas adicionais, como por exemplo o CO .

A proporção de oxidante e de combustível numa mistura arbitrária, relativamente a uma mistura estequiométrica, tem o nome de razão de equivalência ou riqueza da mistura e é descrita da seguinte forma [9]:

$$\phi = \frac{\frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{oxid}}}{\left(\frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{oxid}}\right)_{esteq}} \quad (2.5)$$

O coeficiente de excesso de ar é definido como o inverso da razão de equivalência, como está descrito na equação (2.6):

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{fuel}}}{\left(\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_{esteq}} \quad (2.6)$$

De acordo com as duas equações anteriores podemos classificar os diferentes tipos de misturas da seguinte forma:

$$\lambda < 1,0 \text{ e } \phi > 1,0 \rightarrow \text{mistura rica (deficiência de ar)} \quad (2.7)$$

$$\lambda = 1,0 \text{ e } \phi = 1,0 \rightarrow \text{mistura estequiométrica} \quad (2.8)$$

$$\lambda > 1,0 \text{ e } \phi < 1,0 \rightarrow \text{mistura pobre (excesso de ar)} \quad (2.9)$$

A razão ar/combustível ou a razão estequiométrica de uma combustão é dada tendo em conta o combustível que é utilizado para a combustão. Conhecendo o combustível e a sua composição química e com recurso à equação (2.2), substituindo na equação o número das moléculas de carbono e de hidrogénio do combustível, e fazendo o mesmo com as massas molares do oxigénio (32,00 g/mol), azoto (28,16 g/mol), hidrogénio (1,008 g/mol) e carbono (12,011 g/mol), temos a seguinte equação [10]:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{esteq} = \frac{\left(x + \frac{y}{4}\right)(M_{O_2} + 3,76M_{N_2})}{M_{fuel}} = \frac{\left(x + \frac{y}{4}\right)(32 + 3,76 * 28,16)}{12,011 * x + 1,008 * y} \quad (2.10)$$

Do resultado desta equação obtemos a quantidade de partes de ar necessária para cada parte de combustível para haver combustão. No caso mais comum de produção de energia por parte de motores de combustão interna temos a gasolina e o gasóleo que possuem a sua razão estequiométrica para valores aproximados de 14,6 kg ar/kg fuel e de 14,5 kg ar/kg fuel, respetivamente [8] [11].

Na Tabela 1 são apresentadas algumas características de combustíveis. Estes combustíveis são os mais utilizados para produzir energia na atualidade [1] [12].

Tabela 1 - Propriedades dos combustíveis.

Combustível	Fórmula Química	Massa Molecular [g/mol]	Densidade [kg/cm ³]	Entalpia [MJ/kg]	Razão Estequiométrica [kg ar/kg fuel]
Gasolina	$C_nH_{1,87n}$	110	0,72 a 0,78	44,0	14,6
Gasóleo	$C_nH_{1,8n}$	170	0,78 a 0,84	43,5	14,5
Gás Natural	$C_nH_{3,8n}N_{0,1n}$	18	0,79	45	14,5
Hidrogénio	H_2	2,015	0,09	120	34,3
Propano	C_3H_8	44,1	2,0	46,4	15,67
Álcool Metílico	CH_4O	32,04	0,792	20	6,47
Álcool Etílico	C_2H_6O	46,07	0,785	26,9	9

2.4 Combustão Anormal

As principais diferenças entre o processo de combustão anormal e de combustão normal estão no momento e na posição onde se dá o início da combustão, na maneira como a explosão é iniciada e na velocidade de propagação da frente de chama.

Uma combustão anormal pode manifestar-se de variadas formas, causando danos no motor ou criando barulhos ou ruídos impróprios durante a utilização do motor. Nos motores de ignição por faísca existem três tipos de combustão anormal, a pré-ignição ou também chamada de ignição à superfície, a auto-ignição e a detonação, esta última pode também ser chamada de “batida” ou “knock” ou “grilar” (ver Figura 10).

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

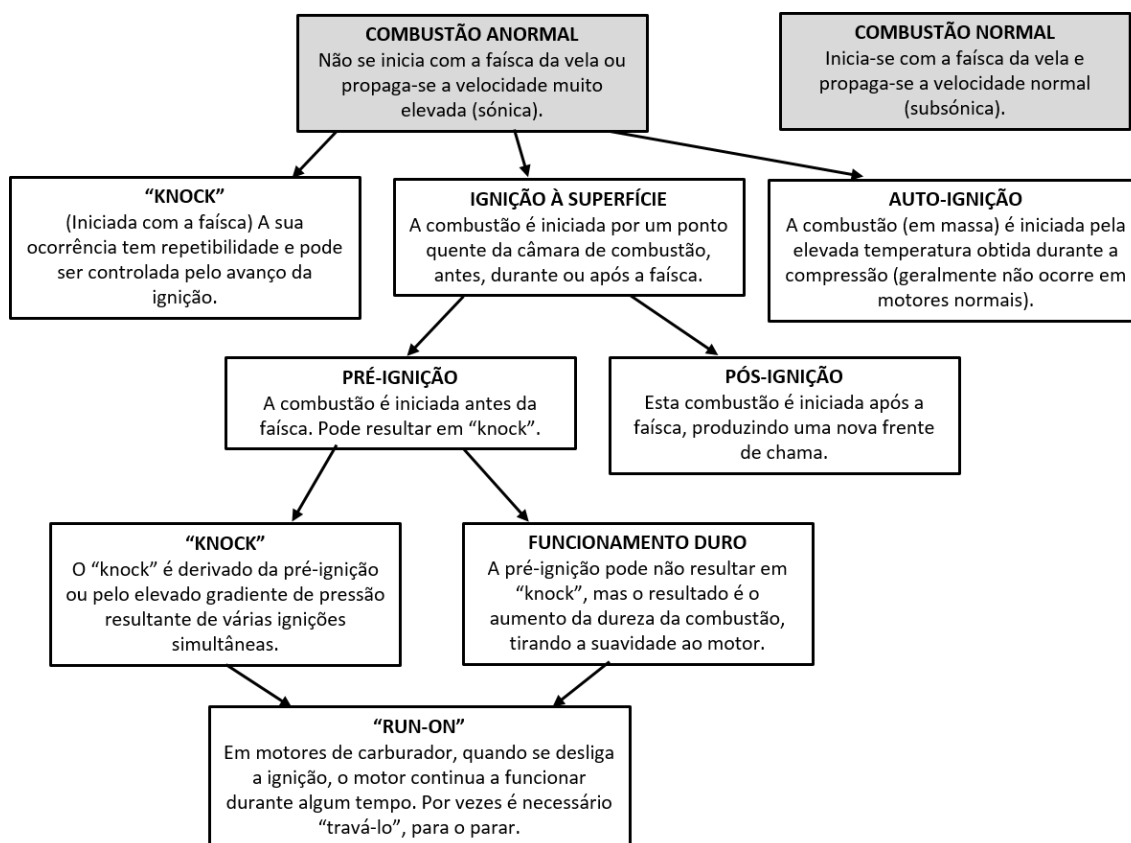


Figura 10 - Combustão anormal [1].

Como observado na Figura 10 podemos dizer que a pré ignição representa uma combustão que é iniciada por um ponto suficientemente quente da câmara de combustão, a auto-ignição consiste numa ignição em massa de toda a mistura causada pela elevada temperatura obtida durante a compressão e a detonação consiste também numa combustão em massa de parte da mistura que geralmente acontece após o início de uma combustão normal.

Estes tipos de combustão anormal tem probabilidade de ocorrer com o aumento da taxa de compressão do motor, com o aumento da temperatura presente no interior do cilindro do motor e com o aumento da riqueza da mistura.

2.4.1 Pré-ignição (ignição à superfície)

A pré-ignição é um tipo de combustão anormal iniciada por um ponto quente, geralmente num depósito carbonoso ou nos eléctrodos da vela, quando a mistura atinge um grau térmico mais elevado do que o necessário para a inflamação. A pré-ignição pode também ser originada a partir da válvula de escape ou a partir de descontinuidades da câmara de combustão.

Como vimos na Figura 10 a ignição à superfície inicia-se antes ou depois da ocorrência faísca da vela. A ignição à superfície divide-se em dois tipos diferentes, a que ocorre antes da faísca que se chama pré-ignição e a que ocorre após a faísca, a pós-ignição.

A pré-ignição é mais preocupante e mais gravosa que a pós-ignição, pois a pré-ignição pode levar à ocorrência da detonação (ver Figura 10). A pré-ignição aumenta o nível térmico do ciclo, o que faz com que o ponto quente originário do início da combustão aqueça mais iniciando a combustão da mistura mais cedo. Desta forma, o ponto de maior pressão do ciclo ocorre antes do PMS anulando o binário do motor. Normalmente o motor não chega a esse ponto, pois dá-se o aparecimento da detonação que ocorre violentamente, elevando ainda mais a temperatura das paredes do cilindro do motor.

Uma das formas que poderia ser possível utilizar para evitar o aparecimento da pré-ignição seria a redução do avanço da ignição, contudo isso não é possível pois quando a pré-ignição ocorre, a mistura já foi queimada. Uma maneira de prevenir a pré-ignição é a utilização de velas mais frias. Neste tipo de velas, a faísca inicia-se nos seus pólos para temperatura entre 1100 e 1300 K, temperaturas acima da das velas tradicionais.

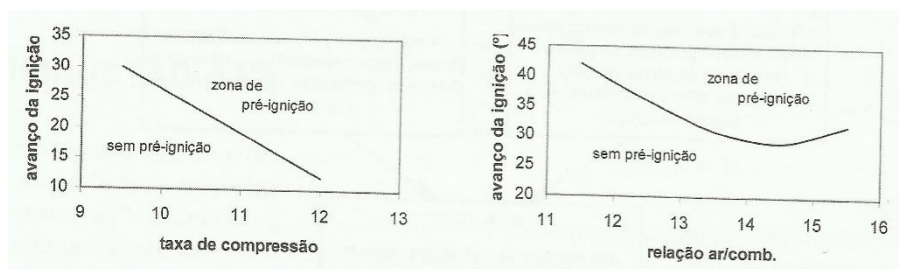


Figura 11 - Aparecimento da pré-ignição [1].

A ocorrência da detonação deve-se ao efeito do aumento da taxa de compressão e do aumento do avanço da ignição na pré-ignição, porque esta combustão anormal aumenta a temperatura podendo originar a ignição à frente da frente de chama.

2.4.2 Auto-ignição

A auto-ignição é um tipo de combustão anormal caracterizada pela ignição instantânea de toda a mistura que se encontra dentro do cilindro do motor. A ignição instantânea da mistura pode ser provocada pelas altas temperaturas que são sentidas dentro do cilindro do motor e pelas ondas de pressão que acontecem durante o período da compressão.

2.4.3 Detonação (“knock”)

Como visto no início desta subsecção a detonação consiste na combustão em massa de parte da mistura presente dentro do cilindro. Esta combustão acontece após o início da combustão normal iniciada pela faísca. O facto de esta acontecer após o início da combustão leva a que as condições de temperatura sejam superiores às sentidas no fenómeno de ignição instantânea, a que velocidade de propagação da chama seja muito superior, à produção de pulsos de pressão agudos associados ao movimento vibratório da carga mecânica e a um som metálico característico, conhecido por “grilar”, “batida” ou “knock” termo em inglês [13].

As principais diferenças entre a combustão normal e o fenómeno de “knock” dá-se no momento da deflagração da mistura, pois na combustão normal esta efetua-se a uma velocidade subsónica, então na detonação a velocidade de propagação é sónica; na combustão normal são geradas ondas de choque que viajam a velocidade do som sendo esta velocidade superior à velocidade de frente de chama, no “knock” a velocidade de frente de chama é igual a velocidade de propagação da pressão levando a um aumento da pressão local e ondas de pressão elevadíssimas, sendo estas ondas de choque responsáveis pelo ruído e vibração característico deste fenómeno (ver Figura 12) [14].

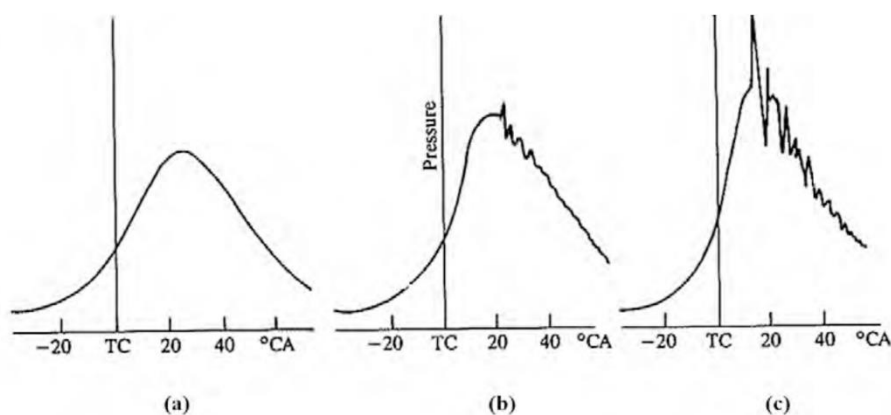


Figura 12 - Pressão no cilindro vs. ângulo da cambota - (a) combustão normal, (b) combustão com ligeiro “knock”, (c) combustão com intenso “knock” [15].

Na Figura 12 podemos observar como o fenómeno da detonação ocorre relacionando a pressão dentro da câmara de combustão com o ângulo da cambota. Verificamos que quanto mais intenso for o “knock” maior são os valores da pressão sentidos dentro do cilindro, assim como são verificadas velocidades elevadas na propagação das ondas de choque durante este tipo de combustão anormal. Estas refletem nas paredes do cilindro e produzem uma pressão oscilatória resultando então na vibração e no ruído característico deste fenómeno.

A detonação pode ocorrer quer a baixas velocidades quer a altas velocidades. Quando ocorre a baixas velocidades estamos na presença de um “knock” de aceleração. Este tipo de “knock” não é muito destrutivo pois esta condição não ocorre durante muito tempo. Por outro lado, a detonação a altas velocidades é considerado mais destrutivo pois não é muito perceptível ao ouvido humano, e é provocado pelas elevadas velocidades e cargas, como o que acontece no andamento de um automóvel na autoestrada. O “knock” de altas velocidades pode levar a:

- Pré-ignição, pelo aquecimento dos depósitos na câmara;
- “Knock” por pré-ignição, cada vez mais cedo e mais intenso, levando à destruição do motor;
- A erosão gradual de regiões da câmara de combustão.

Devido às elevadas pressões e às elevadas temperaturas sentidas dentro do cilindro durante a detonação da mistura são provocados danos no motor. Os danos provocados no motor são de acordo com a intensidade e com o espaço de tempo a que está sujeito ao período de detonação. Quando a detonação é intensa e de períodos prolongados, pode levar a grandes danos no motor e à sua inoperabilidade (ver Figura 13). Os danos mais comuns sentidos no motor devido ao fenómeno da detonação são os seguintes [14]:

- Empenamento e derretimento de partes do pistão;
- Erosão na cabeça do motor;
- Erosão na parte superior do pistão;
- Deterioração das juntas da cabeça do motor;
- Fraturas nas válvulas;
- Derretimento e quebra dos anéis do pistão.



Figura 13 - Dano no pistão devido a detonação [16].

O fenómeno da detonação acontece principalmente em condições de plena carga (borboleta completamente aberta) e para elevadas taxas de compressão, sendo estes fatores uma restrição à potência e binário máximo do motor. Para que este fenómeno não aconteça, a ignição é atrasada ou a taxa de compressão é reduzida levando a binários menores. Os valores da

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

temperatura e da pressão máxima são minimizados, restringindo assim também o rendimento do motor. A detonação está ligada à pré-ignição, pois quanto maior for o avanço à ignição mais provável é o seu aparecimento.

O aparecimento do “knock” é determinado por processos empíricos. Um processo empírico para a determinação do aparecimento da detonação baseia-se em correlações de “tempo de auto-ignição”, assumindo desta maneira que o “knock” ocorre [17]:

$$\int_{t=0}^{t_i} \frac{dt}{\tau} = 1 \quad (2.11)$$

Onde:

$t_i \rightarrow$ tempo de auto – ignição para a temperatura e pressão instantânea

$\tau \rightarrow$ tempo para aparecer a auto – ignição (s)

$t \rightarrow$ tempo desde início de compressão

Uma possível relação empírica para a determinação do aparecimento do “knock” é a proposta por Douad e Eyzat [18]:

$$\tau = 17,68 \left(\frac{IO}{100} \right)^{3,402} p^{-1,7} \exp \left(\frac{3800}{T} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

$T \rightarrow$ temperatura (K)

$p \rightarrow$ pressão absoluta (atm)

$IO \rightarrow$ índice de octano do combustível

Na utilização da equação (2.12) é necessário calcular os valores da pressão e da temperatura locais durante a compressão e combustão até a frente de chama chegar ao local em questão, incluindo a transferência de calor entre o gás e as paredes e o calor ganho por radiação com a frente de chama.

É possível prever o acontecimento do “knock” relacionando a taxa de compressão com o avanço da ignição e a relação ar/combustível com o avanço da ignição, como podemos verificar na

Figura 14, onde vemos as zonas onde existe a ocorrência de “knock” e as zonas onde este não está presente.

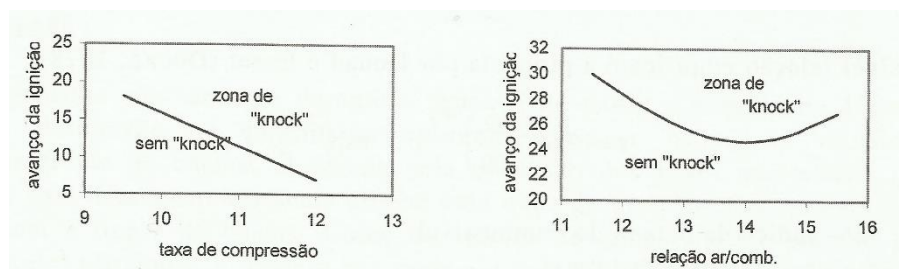


Figura 14 - Aparecimento do “knock” [1].

O fenómeno de “knock” pode ser minimizado de variadas maneiras. Em seguida são apresentadas e descritas algumas dessas formas [1] [14] [19] [20]:

- **Reduzindo o avanço da ignição** - como observado na figura 14 quanto maior for o avanço da ignição mais riscos temos que ocorra “knock” pois a temperatura e a pressão dos gases são maiores. O avanço da ignição por norma está regulado para obter o binário máximo, isto é, no limite do aparecimento da detonação. Se durante a operação do motor forem detetadas temperaturas elevadas ou pressões elevadas, o controlo eletrónico do motor reduz o avanço da ignição de modo a que o motor não entre em detonação;
- **Aumentando o IO do combustível** - entende-se por IO o índice octano de combustível, este índice mede a resistência à detonação dos combustíveis. Quanto mais elevado for o valor deste índice num determinado combustível, maior será a sua resistência à detonação. Desta maneira, um combustível como a gasolina sem chumbo 98 apresenta uma maior resistência à detonação que uma gasolina sem chumbo 95. A Figura 15 apresenta a relação que existe entre os átomos de carbono por molécula e a taxa de compressão de um motor quanto à criação de “knock”;

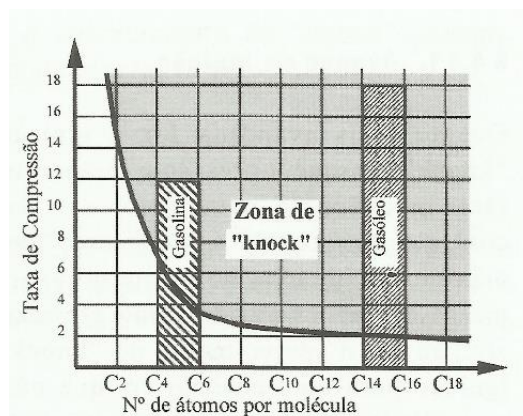


Figura 15 - Knock (em motores de válvulas laterais) função do número de átomos de carbono por molécula [1].

Verificamos que à medida que se aumenta o número de átomos de carbono de um determinado combustível, e a taxa de compressão do motor vai diminuindo, a possibilidade de ocorrer “knock” é maior.

- **Reduzindo a taxa de compressão** - sendo a taxa de compressão um dos parâmetros mais importantes na potência e rendimento do motor, este está limitado devido à detonação. Como já observado anteriormente, Figura 14, uma das maneiras de reduzir o aparecimento do “knock” consiste na redução das taxas de compressão de um motor;
- **Aumentando a turbulência** - com o aumento da turbulência, a velocidade de propagação da chama irá ser maior, sendo também a combustão mais rápida não dando tempo à ocorrência do “knock”;
- **Reduzindo a carga** - ao aumentarmos a carga de um motor vamos originar pressões e temperaturas mais elevadas sendo estes fatores importantes para a ocorrência da detonação. Ao reduzirmos as cargas sentidas no motor obrigamos a que este tenha um maior avanço da ignição fazendo com que também possa existir o aparecimento de “knock”, embora que esta redução da carga este aparecimento seja improvável de acontecer;
- **Aumentando a riqueza da mistura** - ao enriquecer a mistura estamos a utilizar uma mistura com mais combustível para aquecer e vaporizar, o que leva a que sejam atingidas menores temperaturas ao longo do ciclo. Contudo, ao aumentarmos a riqueza da mistura vamos levar a que a mistura arda mais rapidamente, aumentando assim o aparecimento do “knock” para misturas ricas. Por outro lado, se utilizarmos uma mistura pobre, isto é, com mais oxidante, esta origina temperaturas mais baixas, retardando desta forma o aparecimento do “knock”. O aparecimento de “knock” é favorecido para misturas estequiométricas ou ligeiramente pobres tal como demonstrado na Figura 16;

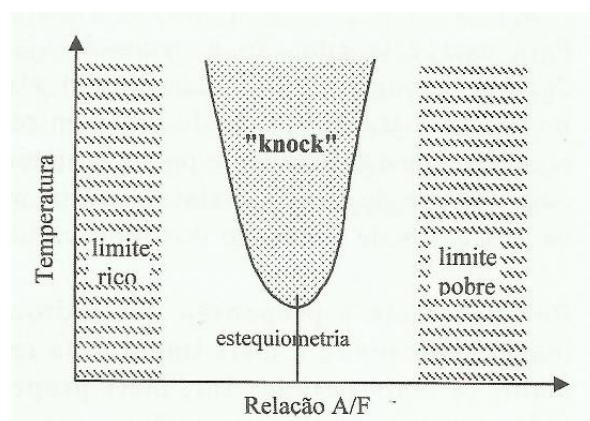


Figura 16 - Ocorrência do “knock” função da temperatura e riqueza da mistura [1].

- **Aumentando a velocidade do motor** - o aumento da velocidade do motor origina a existência de mais turbulência dentro da câmara de combustão, sendo mais fácil controlar o aparecimento do “knock”. Além deste facto, o aumento de velocidade do motor faz com que exista pouco tempo para a ocorrência do “knock”, sendo rara para velocidades muito elevadas;
- **Reduzindo a temperatura e a pressão na admissão** - a redução da temperatura e pressão na admissão faz com que a mistura tenha temperaturas e pressões inferiores aquando do início da combustão, sendo benéficas para o não aparecimento do “knock”. Os motores que fazem uma compressão prévia da mistura devem usar “intercooler” para fazer o arrefecimento da carga que entra no motor e possibilitar também o aumento do binário do motor pois este perde uma maior densidade de carga e tem um maior avanço da ignição;
- **Reduzindo as temperaturas máximas das paredes da câmara de combustão** - ao reduzir as temperaturas dentro das paredes da câmara de combustão descemos também as temperaturas durante o ciclo, o que reduz a possibilidade de existir a ocorrência de “knock”;
- **Reduzindo a distância máxima entre a vela e qualquer ponto da câmara de combustão** - com a redução da distância entre a vela de ignição com qualquer ponto da câmara de combustão é minimizado o percurso percorrido pela frente de chama e desta maneira toda a mistura arde antes do aparecimento do “knock”;
- **Usando câmaras de combustão mais compactas** - quanto mais compacta for uma câmara de combustão, menos propensão existirá para a ocorrência da detonação. É também necessário que exista um bom arrefecimento da câmara de combustão de maneira a garantir uma temperatura o mais uniforme possível dentro da câmara de combustão, sem a existência de pontos quentes. A experiência demonstra que a melhor câmara de combustão para evitar a ocorrência do “knock” é a câmara de combustão do tipo hemisférica (ver Figura 17). A câmara de combustão hemisférica tem as válvulas à cabeça e com a vela de ignição ao centro. Este tipo de câmaras de combustão possibilita um bom arrefecimento e o percurso percorrido pela frente de chama é minimizado;

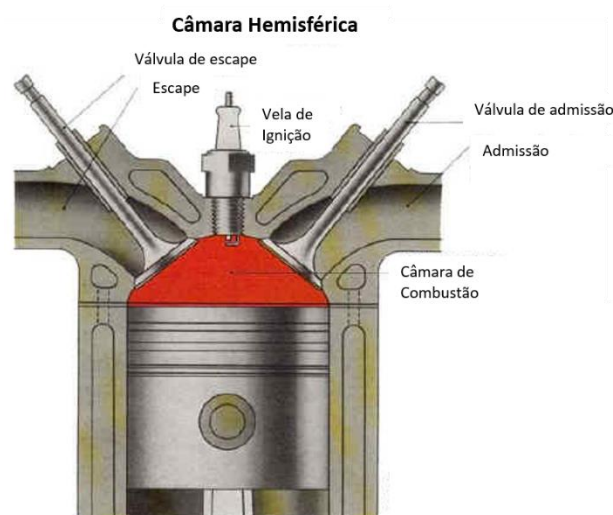


Figura 17 - Câmara de combustão hemisférica [21].

- **O estado de conservação dos componentes do motor** - o estado de conservação dos componentes do motor é um fator importante pois o seu mau estado de conservação, os anos de utilização do componente e o desgaste deste levam a que mais facilmente ocorra “knock”. É recomendado que se faça regularmente uma verificação dos componentes do motor;
- **Recirculação de gases de escape (EGR)** - com a recirculação dos gases de escape é possível reduzir a temperatura máxima de chama, reduzindo desta forma a possibilidade de ocorrência do “knock”.

Estas são as formas gerais de reduzir o aparecimento do fenómeno de “knock”. Contudo, como observado no início desta secção, os motores de combustão interna por norma funcionam de acordo com o ciclo de Otto ou ciclo de Diesel. Desta forma, estes dois tipos de motores, motor de Otto e motor de Diesel, tem comportamentos diferentes quanto ao aparecimento da detonação.

A Tabela 2 apresenta algumas das causas que levam ao aumento ou a diminuição da possibilidade do “knock” ocorrer nestes dois tipos de motor [22]:

Tabela 2 - Fatores que influenciam a detonação.

A detonação aumenta	
No motor Diesel	No motor Otto
Com baixa compressão	Com compressão elevada
Com estrangulamento do ar de admissão	Com sobrealimentação
Com cargas baixas	Com cargas elevadas
Com aumento de RPM	Com diminuição de RPM
Com descida da temperatura do ar da água de refrigeração e da temperatura da cabeça do motor	Com aumento da temperatura do ar, da água de refrigeração e da temperatura da cabeça do motor
Com hidrocarbonetos de cadeia fechada (aromáticos, nafténicos)	Com hidrocarbonetos de cadeia aberta (parafínicos, olefínicos)
Com depressantes de I.O.	Com aceleradores de ignição
No motor Otto	No motor Diesel
A detonação diminui	

2.5 Sensores de Detonação

Com a evolução dos motores de combustão interna foram introduzidos sensores, de modo a analisar e controlar o funcionamento do motor. Os sensores permitem dar informação ao utilizador e à unidade comando eletrónico do funcionamento do motor ao longo da sua atividade. Como exemplos temos os sensores de pressão, os sensores de posição linear e angular, os sensores de caudal, os de temperatura e humidade, os sensores de gases de escape, o sensor de velocidade e aceleração, os sensores de detonação e os sensores de binário, entre muitos outros.

Ao longo desta dissertação, o sensor mais utilizado é o sensor de detonação (ver Figura 18), pois este é o sensor indicado para a realização deste trabalho. O sensor de detonação ou acelerómetro mecânico é constituído por um cristal piezoelétrico ou piezo-cerâmico do tipo não ressonante, o qual tem a capacidade de converter a energia mecânica, vibração que resulta do fenómeno da detonação, num sinal elétrico, *Volts* em AC [19].

A principal função da utilização dos sensores de detonação é proporcionar um melhor desempenho e economizar a utilização dos motores. No ciclo Otto, estes sensores permitem

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

que o ponto de ignição trabalhe o mais próximo possível do ideal. Por outro lado, no ciclo Diesel, o ideal é que o ponto de ignição trabalhe o mais próximo do limite da detonação [23].

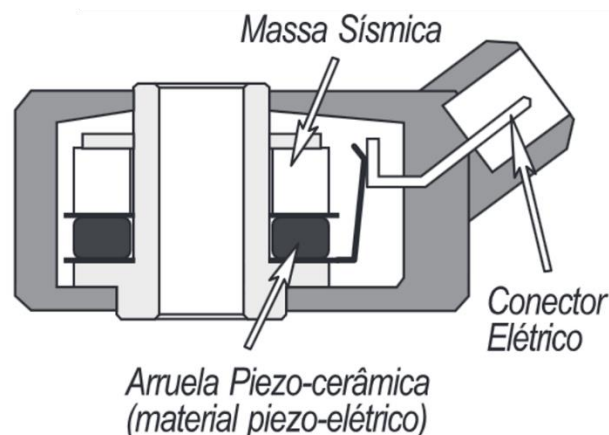


Figura 18 - Sensor de detonação [24].

O sensor de detonação é ligado a UCE através de um cabo blindado de modo a que este não sofra interferências eletromagnéticas. A unidade de comando eletrónico recebe os dados fornecidos pelo sensor identificando-os e separando a vibração que resulta da detonação dos outros tipos de vibração presentes no motor, tais como a vibração causada pela folga da biela ou mesmo o funcionamento das válvulas do motor. A UCE por sua vez com os valores fornecidos pelo sensor de detonação modela o sistema de ignição de maneira a que o motor consiga atingir valores de rendimento superior e ao mesmo tempo proteger o motor dos possíveis danos causados pela detonação.

Existem duas maneiras de obter os valores referentes à detonação: por medida direta ou por medida remota [25].

No método de medida direta os sensores medem a pressão no interior da câmara da combustão do motor em funcionamento, este tipo de método permite obtenção de um sinal com uma qualidade melhor para a analisar e detetar a detonação, contudo cada cilindro requer o seu próprio sensor e cada sensor tem um custo elevado. Por outro lado, no método de medida remota, os sensores fazem uso das vibrações transmitidas através da estrutura do motor para detetar a detonação na câmara de combustão. O método de medida remota tem a vantagem de ser mais barato, porque os sensores trabalham em ambientes menos agressivos, e com apenas dois sensores conseguimos monitorizar todos os cilindros do motor. Porém, os sinais recebidos pelos sensores remotos podem exibir outras fontes de sinais que não a detonação, o que aumenta a dificuldade na utilização, especialmente a altas rotações do motor, onde o ruído de fundo das vibrações mecânicas é mais evidente.

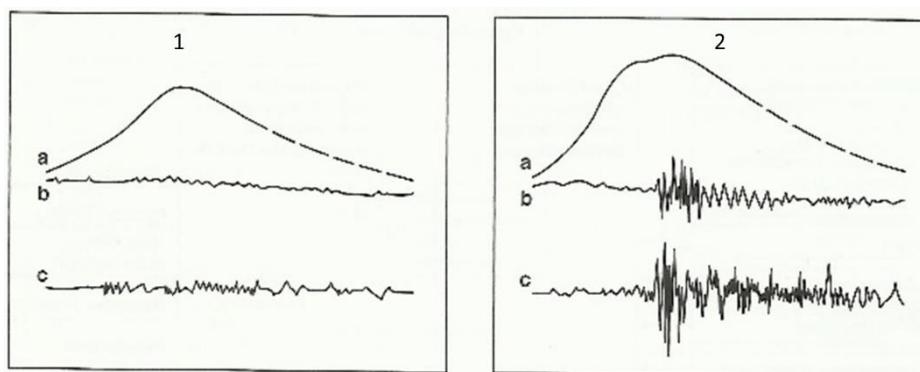


Figura 19 - Sinal de um sensor de detonação - (1) sem detonação, (2) com detonação [26].

Na figura 19 os sinais *a*, *b* e *c* representam, respetivamente: o sinal elétrico recolhido pelo sensor de pressão dentro da câmara de combustão, o sinal filtrado pelo sensor de detonação e o sinal captado pelo sensor de detonação de um motor.

Os sensores de medida remota podem ser classificados como sensores ressonantes ou sensores não ressonantes. Os sensores ressonantes são utilizados em sistemas de controlo de detonação de baixo custo, o sensor é excitado pela detonação e amplifica os sinais na frequência de ressonância, exibindo picos de voltagem que podem chegar aos 20 kHz. De outro modo os sensores não-ressonantes apresentam uma curva de sinal que se assemelha a uma reta.

No mercado existem vários tipos de sensores de detonação. Alguns dos sensores são apresentados a seguir, bem como as principais características destes [27]:

- **Sensor de detonação** - este foi o primeiro sensor de detonação a ser utilizado num motor. Este sensor (ver Figura 20) é colocado no bloco do motor de modo a conseguir captar as vibrações produzidas pela combustão. O sensor de detonação magnetorestritivo é capaz de obter melhor qualidade do sinal, contudo a construção deste tipo de sensor é muito difícil o que o torna um sensor caro;

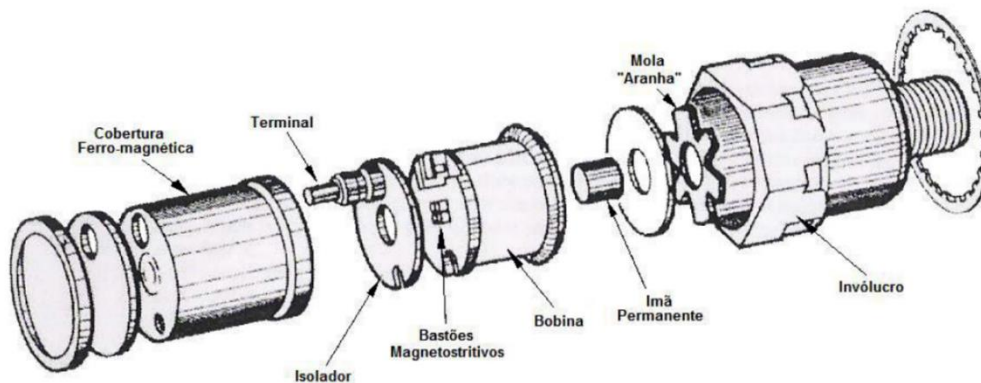


Figura 20 - Sensor de detonação magnetorestritivo [27].

- **Sensor de detonação baseado em acelerômetros** - este tipo de sensores surgiram na tentativa da indústria automóvel conseguir construir um sensor de baixo custo. O sensor de detonação baseado em acelerômetros não é capaz de produzir um sinal de qualidade inferior ao do sensor de detonação magnetorestritivo, mas por sua vez este tipo de sensor é relativamente barato e o mesmo sensor pode ser utilizado em diferentes tipos de motor;
- **Acelerômetros piezoelétricos** - estes acelerômetros têm com principal característica a sua piezoelectricidade, isto é, estes acelerômetros são constituídos por cristais que estão orientados de uma forma que quando submetidos a algum tipo de deformação produzem uma tensão elétrica proporcional à deformação a que for submetidos. Na utilização destes sensores (ver Figura 21) é necessário ter atenção para que algumas vibrações contaminantes não alterem os valores de vibração causados pela detonação;

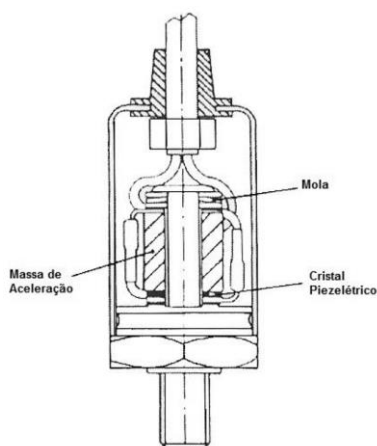


Figura 21 - Acelerómetro piezoelétrico [27].

- **Sensor de detonação piezo-cerâmico** - este tipo de sensor (ver figura 22) é muito idêntico ao acelerómetro piezoelétrico, contudo não usa cristais normais no seu interior mas sim cristais piezo-cerâmicos. Os cristais piezo-cerâmicos são cristais que podem ser moldados sobre a forma de isolador cerâmico ou sobre a forma de condutor. Estes cristais operam na perfeição mesmo quando os materiais estão em funcionamento a altas temperaturas ou a funcionar acima da sua temperatura de Curie (é a temperatura na qual o magnetismo permanente de um material se torna um magnetismo induzido). Este tipo de sensores são os mais utilizados no meio automóvel, pois são sensores de construção barata e de fácil utilização;

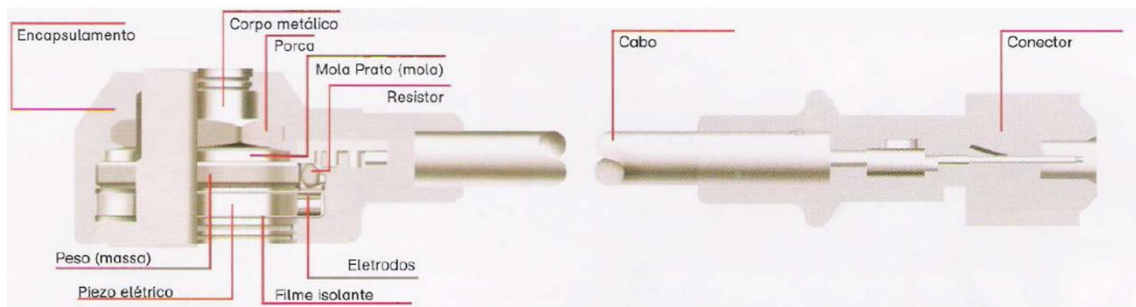


Figura 22 - Sensor de detonação piezo-cerâmico [27].

- **Acelerômetro de silício** - o acelerômetro de silício é utilizado em travões ABS e em gatilhos para Airbags. Estes acelerômetros têm a sua temperatura limite de operação a 150 °C, o que faz com que seja possível a sua introdução dentro do bloco do motor de maneira a estar mais perto do fenómeno da combustão.

3. Experiência Laboratorial

A realização da parte experimental desta dissertação foi executada no Laboratório de Energética e Máquinas Térmicas do Departamento de Eletromecânica da UBI. Foram usados as ferramentas e os aparelhos que se encontram descritos neste capítulo. Ao longo deste capítulo será descrito todo o material, todos os procedimentos efetuados, bem como todos os métodos utilizados na realização da parte experimental desta dissertação.

3.1 Componentes Utilizados

3.1.1 Motores

Na realização da parte experimental desta dissertação foram utilizados três motores de combustão interna disponíveis no Laboratório de Energética e Máquinas Térmicas. Os motores utilizados foram os seguintes:

- **OPEL ASTRA 1.4i** - este é um motor de 4 cilindros em linha, tem uma cilindrada de 1389 cm^3 e o seu funcionamento é segundo o ciclo de Otto de quatro tempos [28]. Para encontrar mais especificações sobre este motor é aconselhável consultar o Anexo A1 desta dissertação. O motor **OPEL ASTRA** (ver Figura 23) está instalado num banco de ensaios no LEMT do DEM.



Figura 23 - Banco de ensaios OPEL ASTRA 1.4i.

- **LOMBARDINI LDW 502** - este motor funciona segundo o ciclo de Diesel a quatro tempos, tem dois cilindros que se encontram ligados ao mesmo excêntrico e tem uma cilindrada de 505 cm^3 [29]. Para outras informações acerca das características deste motor é aconselhável consultar o Anexo A2 no final desta dissertação. O motor **LOMBARDINI** está instalado no LEMT do DEM, num banco de suporte como é apresentado na Figura 24 que se segue.



Figura 24 - Banco de ensaios LOMBARDINI LDW 502.

- **HONDA GX 120** - este motor tem apenas um cilindro, tem uma cilindrada de 118 cm^3 , funciona segundo um ciclo de quatro tempos de Otto e é controlado por uma centralina eletrónica da Haltech [30] [31]. Na Figura 24 está apresentado o motor **HONDA GX 120**, montado sobre uma bancada no LEMT do DEM. Para mais informações acerca deste motor é aconselhável consultar o Anexo A3 desta dissertação.

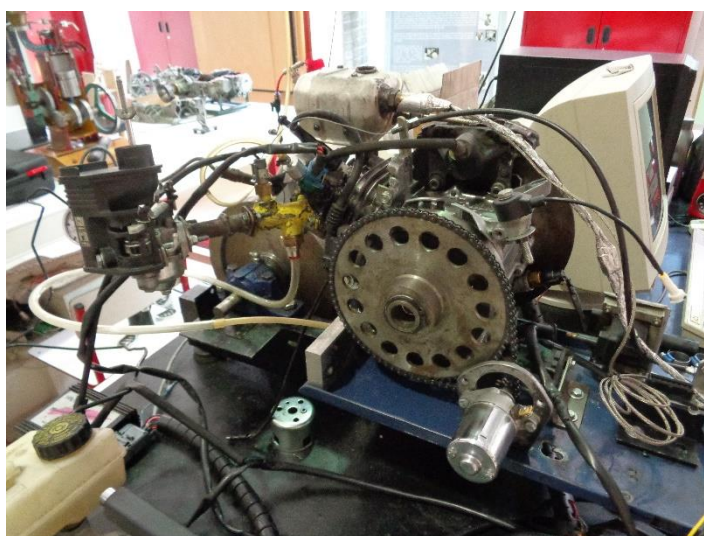


Figura 25 - Banco de ensaios HONDA GX 120.

3.1.2 Sensores

Os sensores são elementos fundamentais neste trabalho, pois estes fornecem a informação sobre o funcionamento do motor. Através da análise da informação recolhida por estes sensores foi possível verificar se o motor estava a funcionar ou não de acordo com o programado para a sua utilização.

Para a elaboração desta dissertação foram utilizados dois sensores, um sensor de detonação e um sensor de relutância variável.

O sensor de detonação utilizado para a realização da parte experimental desta dissertação trata-se do *SKU 041848* (ver Figura 26).



Figura 26 - Sensor de detonação SKU 041848.

Um dos pontos de maior dificuldade no uso deste tipo de sensor depreende-se com a falta e a restrição de informação dada pelo fabricante ou pelo fornecedor deste tipo de sensores. Sabemos que este sensor de detonação se trata de um sensor não ressonante, é um sensor piezo-cerâmico e é utilizado em motores da marca *SUBARU*, tais como o *SUBARU SVX*, *SUBARU IMPREZA* e o *SUBARU LEGACY*. O sensor *SKU 041848* tem de ser apertado ao motor com um momento de aperto de 24 N.m .

Como referido acima foi também utilizado um sensor de relutância variável (VRS) (ver Figura 27).



Figura 27 - Sensor VRS.

Os VRS são utilizados para medir a posição e a velocidade de um componente metálico que se encontra em movimento. Este tipo de sensor é formado por um íman, um pólo ferromagnético e uma bobina. O VRS é colocado numa parte fixa e aponta para uma roda dentada, um dos elementos da roda tem de estar mais ou menos saliente que os restantes. Quando a roda executa a sua rotação a relutância dentro da bobina é alterada o que reflete uma mudança nos valores da tensão. A leitura dos valores obtidos pelo VRS é feita por parte de um circuito externo que vai apresentando os valores da tensão ao longo da rotação da roda dentada. Como na roda dentada existe um elemento mais ou menos saliente do que os restantes é verificado na passagem por esse elemento uma alteração à tensão, podendo ser marcado nesse ponto de tensão o ponto inicial de um ciclo de rotação da roda.

3.1.3 PicoScope Automotive

O *PicoScope 3223* (ver Figura 28) foi a ferramenta escolhida para a recolha e análise dos dados dos sensores durante o funcionamento do motor. O *PicoScope* não é nada mais que um osciloscópio para computador, este aparelho é ligado por um cabo *USB* ao computador e por cabos aos sensores dos quais se pretende retirar a informação pretendida.



Figura 28 - PicoScope Automotive.

O *PicoScope* do DEM da UBI, trata-se de um *PicoScope Automotive* de 2 entradas BNS, sendo possível recolher dados de dois sensores diferentes ao mesmo tempo. Como referido acima, o *PicoScope* é ligado aos sensores no motor e a um computador que recebe os dados por eles enviados. Como tal é necessário que no computador esteja instalado um programa de recolha e de análise de dados, foi utilizado então o *software* informático *PicoScope 6 Automotive* [32], que é uma aplicação específica do *PicoScope* para a indústria automóvel.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação

Depois de seleccionar os materiais necessários para a realização da parte experimental desta dissertação, avançou-se para a realização dos preparativos essenciais para realização da experiência. Como se realizou a experiência em três tipos de motores diferentes, foi necessária a preparação individual de cada motor para a realização da mesma.

A primeira parte da experiência foi realizado no motor da *OPEL* que se encontra no LEMT do DEM.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

O trabalho de preparação da experiência no motor *OPEL* consistiu na instalação do sensor de detonação, que é uma das partes mais importantes do trabalho experimental, visto que a colocação deste sensor é fundamental para a qualidade do sinal recebido por parte do *PicoScope*. Na instalação do sensor deve-se ter em consideração que existem bons e maus locais para o colocar. Um mau local para a colocação destes tipos de sensor são as zonas de proteção do bloco do motor em plástico, pois o plástico é um material que possibilita a absorção de algumas vibrações, dificultando a transmissão de vibrações do motor e degradando a qualidade do sinal detetado pelo sensor. Por outro lado, para uma boa colocação deste tipo de sensor é preciso procurar um local plano e sem imperfeições na sua superfície de modo a garantir uma boa qualidade do sinal. É também necessário respeitar o momento de aperto recomendado pelo fabricante do sensor. Tendo em conta estes critérios, o local escolhido para a instalação do sensor foi o apresentado na Figura 29.



Figura 29 - Instalação sensor de detonação no motor OPEL.

Depois da instalação do sensor de detonação foi necessário proceder à instalação de um sensor de relutância variável de maneira a ser possível identificar o movimento do pistão dentro do cilindro. Através deste sensor é possível identificar o final de cada ciclo de funcionamento do motor é atingido e quando se dá início a um novo ciclo de funcionamento. O VRS foi instalado neste motor com está demonstrado na Figura 30.

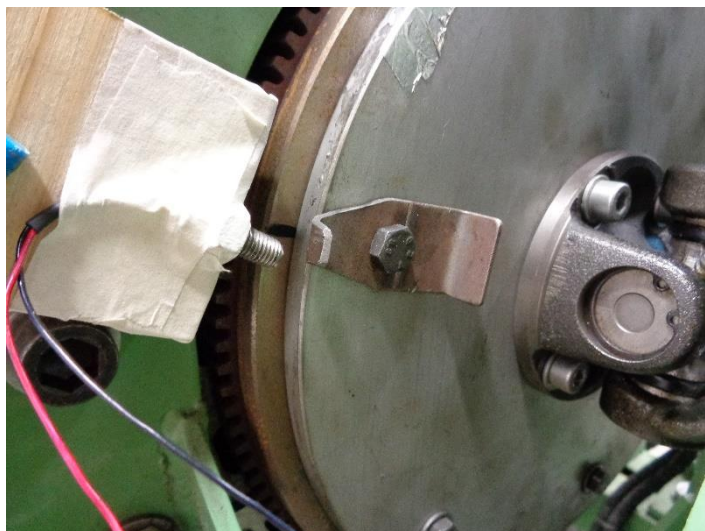


Figura 30 - Instalação sensor VRS no motor OPEL.

Como é possível observar na Figura 30, colocou-se uma peça de metal que se destaca da roda dentada, esta peça dá a indicação em que um dos êmbolos do motor se encontra no seu PMS e com isso conseguimos saber o tempo necessário para a realização de um ciclo de funcionamento do motor.

A segunda parte da experiência foi realizada no motor a diesel da *LOMBARDINI*, e tal como no motor da *OPEL* foi necessário instalar o sensor de detonação e o sensor de relutância variável.

Tal como referido na instalação do sensor de detonação no motor da *OPEL* é necessário ter atenção a sua colocação, esta tem de ser de maneira a que não interfira na recolha das vibrações do motor. Desta forma o sensor de detonação foi instalado como se apresenta na Figura 31.

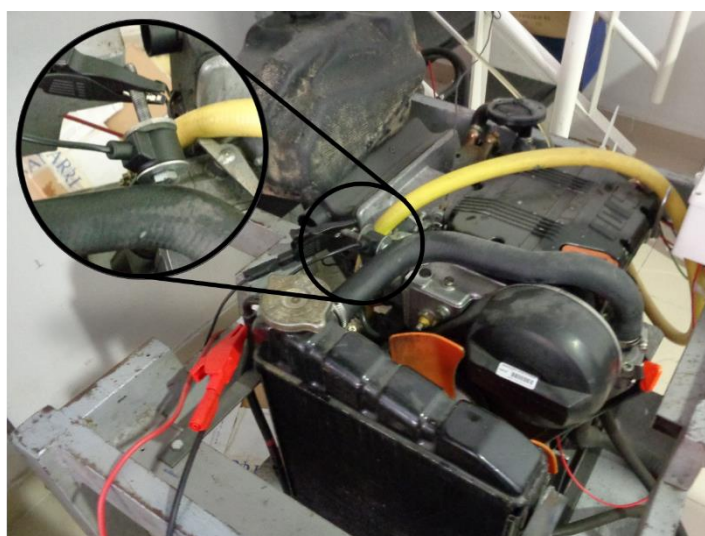


Figura 31 - Instalação sensor de detonação no motor LOMBARDINI.

Foi necessário também proceder a instalação de um VRS para que da mesma forma, tal como no motor *OPEL*, seja possível ter informação sobre o ciclo de funcionamento do motor e desta maneira retirar a informação. Para a instalação do VRS ser possível foi criada uma peça externa ao motor, como se apresenta na Figura 32.



Figura 32 - Instalação sensor VRS no motor LOMBARDINI.

Esta peça é feita em metal, e foi acoplada ao tambor do motor de maneira a que quando a cambota realizar o seu movimento, esta peça tenha um movimento concordante com esta. A peça foi orientada e centrada de acordo com o PMS de um dos cilindros do motor, para isso procedeu-se à abertura da cabeça do motor de modo a que fosse possível identificar quando o pistão se encontrava no PMS do cilindro e assim estabelecer a posição da peça no tambor do motor.

A terceira parte do trabalho experimental foi desenvolvida no motor *HONDA GX 120*. *Este* motor pertence ao LEMT do DEM da UBI, e encontra-se montado num banco de ensaio.

Inicialmente, procedeu-se então à instalação do sensor de detonação no motor (ver Figura 33).

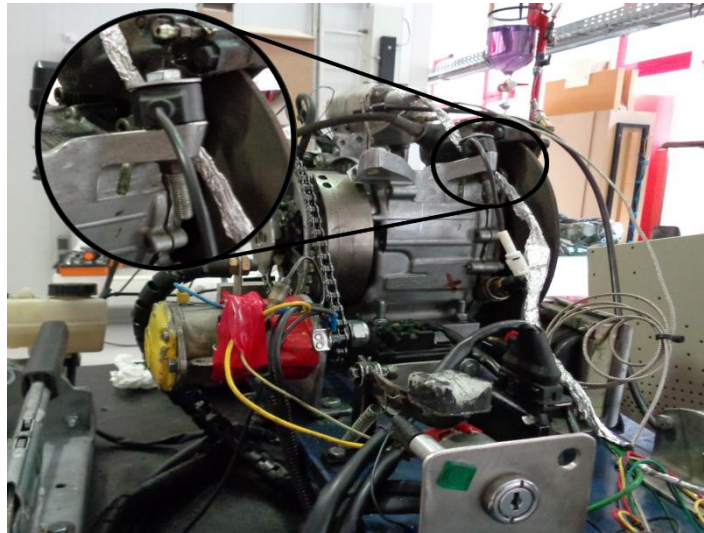


Figura 33 - Instalação sensor de detonação no motor HONDA.

Na colocação do sensor foram tomados em consideração os aspetos que já foram mencionados anteriormente, como por exemplo, o sensor ter de ser instalado numa superfície plana, não rugosa e que não estivesse em contacto com qualquer peça de plástico, estar o mais próximo do cilindro do motor e o momento de aperto do sensor ao motor. Seguindo estas considerações o sensor foi instalado como está mostrado na Figura 33.

Neste motor não foi utilizado um sensor VRS pois este motor já possui um sensor de Hall (ver Figura 34) que permite identificar o início e o fim de cada ciclo de funcionamento do motor.

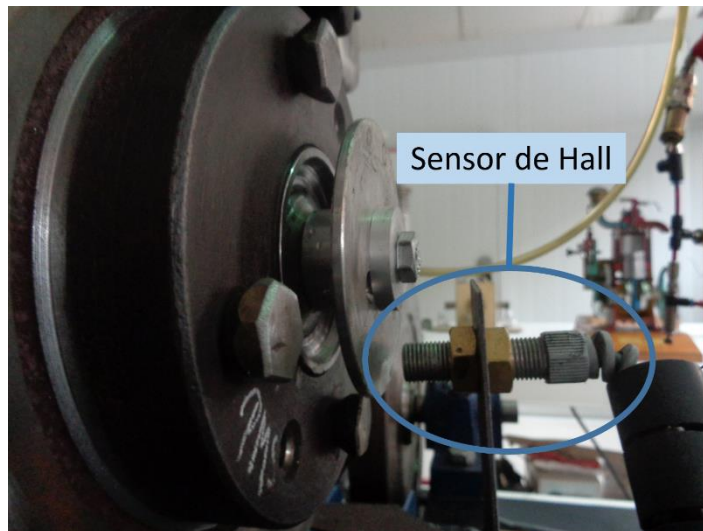


Figura 34 - Sensor de Hall.

3.2.2 Aquisição de Dados

Na aquisição dos dados dos ensaios laboratoriais foi utilizado o *PicoScope*, esta ferramenta permite a recolha destes dados graças ao seu *software* informático *PicoScope 6 Automotive*. Este *software* permite recolher e guardar os sinais recolhidos pelos vários sensores a ele ligados e ainda realizar uma primeira análise dos dados recolhidos pelos sensores.

O *PicoScope 6 Automotive* é um programa informático desenvolvido pela *PicoScope* vocacionado especialmente para a indústria automóvel com ferramentas próprias para os vários tipos de sensores e atuadores que se encontram presentes num automóvel. Para os diferentes tipos de teste que se pretende realizar é escolhido um menu diferente para a aquisição de dados (ver Figura 35).

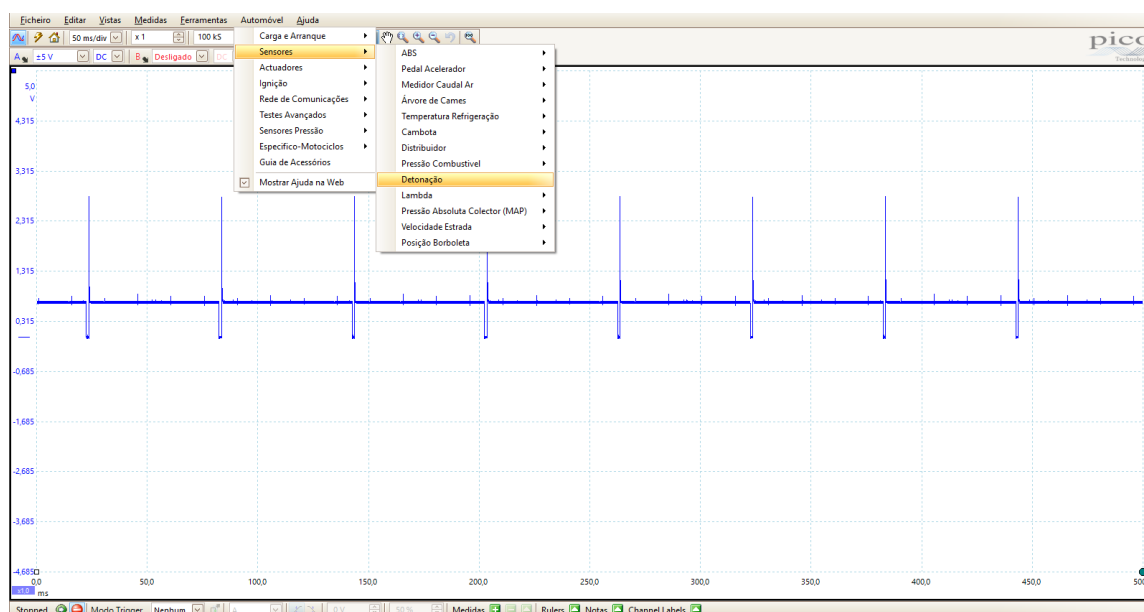


Figura 35 - Menus *PicoScope Automotive*.

Dado o cariz deste trabalho experimental foi escolhido do menu dos sensores o menu correspondente aos sensores de detonação. Depois de definido o menu para a atividade experimental é necessário definir e caracterizar o sinal recebido, definindo as escalas utilizadas para proceder à leitura do sinal e o modo como é efetuada a captura do sinal.

Para a realização deste trabalho experimental foi escolhida uma escala de tempo de 10 ms/div , uma escala de tensão para a leitura do sinal de $\pm 5\text{ V}$, em corrente AC e um número máximo de amostras de 500 KS , sendo que este último parâmetro que influencia acima de tudo o detalhe na captura do sinal (ver Figura 36).

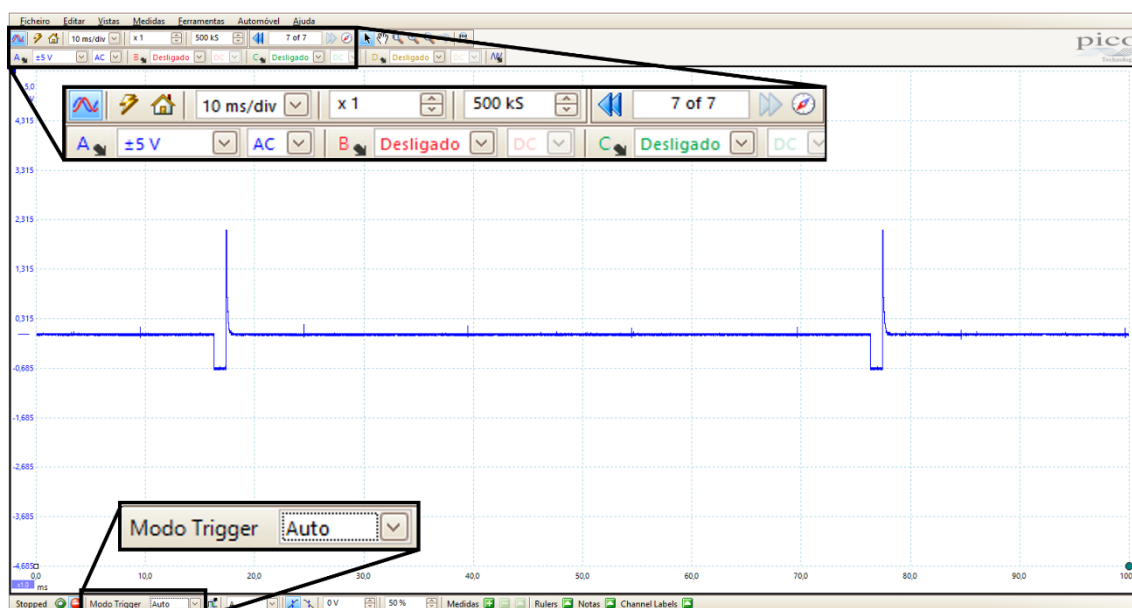


Figura 36 - PicoScope escalas usadas.

No *software* informático *PicoScope 6 Automotive* existem várias formas de efetuar a captura do sinal, como por exemplo, a captura automática, a captura repetitiva, a captura singular e a captura rápida. Para esta atividade laboratorial, optou-se pela captura automática pois este tipo de captura permite que esta seja feita de maneira contínua a partir do momento em que o utilizador carrega no botão correspondente ao início da captura até ao momento em que o utilizador carrega no botão para terminar a leitura do sinal. O sinal capturado pode ser guardado num só ou em mais *buffers*, isto é, o *PicoScope* tem uma opção que dependendo das configurações escolhidas para a análise do sinal seja possível ou não guardar mais do que uma forma de onda para uma determinada captura (ver figura 36).

Após serem recolhidas as informações dos sensores instalados no motor por parte do *software* informático *PicoScope* estas informações foram analisadas e a sua informação foi tratada em folhas de cálculo do *Microsoft Office Excel*. No *Microsoft Office Excel* foram elaboradas algumas tabelas e alguns gráficos para possibilitarem a relação dos vários dados recolhidos pelo *PicoScope*.

3.3 Descrição da Experiência

Após se ter finalizado todos os preparativos para a realização da experiência, avançou-se para a realização da mesma.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

A parte experimental no motor *OPEL* consistiu na realização de duas corridas ao longo das rotações de funcionamento do motor. Para a realização dos ensaios foi utilizado como combustível gasolina sem-chumbo 95, sem uma carga dinâmica aplicada e sem alteração nos ângulos de AI, pois estes ângulos de AI são controlados eletronicamente variando para as diferentes rotações de funcionamento do motor.

Iniciou-se a captação dos sinais recolhidos pelo sensor de detonação e pelo VRS quando o motor se encontrava a funcionar ao ralenti e depois foi-se subindo o valor da rotação de 500 *rpm* em 500 *rpm* até atingirmos uma rotação com valores perto dos 6000 *rpm*. De maneira a conseguir controlar os valores da rotação do motor *OPEL* utilizou-se o potenciômetro de controlo do motor que possibilita controlar a velocidade de rotação do motor, fazendo esta subir ou descer conforme o pretendido. Recorreu-se ainda ao amostrador digital dos valores da rotação por minuto do motor que existe no banco de ensaios, como apresentado na Figura 37.



Figura 37 - Banco de ensaios *OPEL ASTRA 1.4i*.

Após ter-se realizado as corridas pelos diferentes valores de velocidade de rotação do motor procedeu-se à análise das imagens recolhidas em cada uma destas rotações (ver Figura 38), por parte do *PicoScope*.

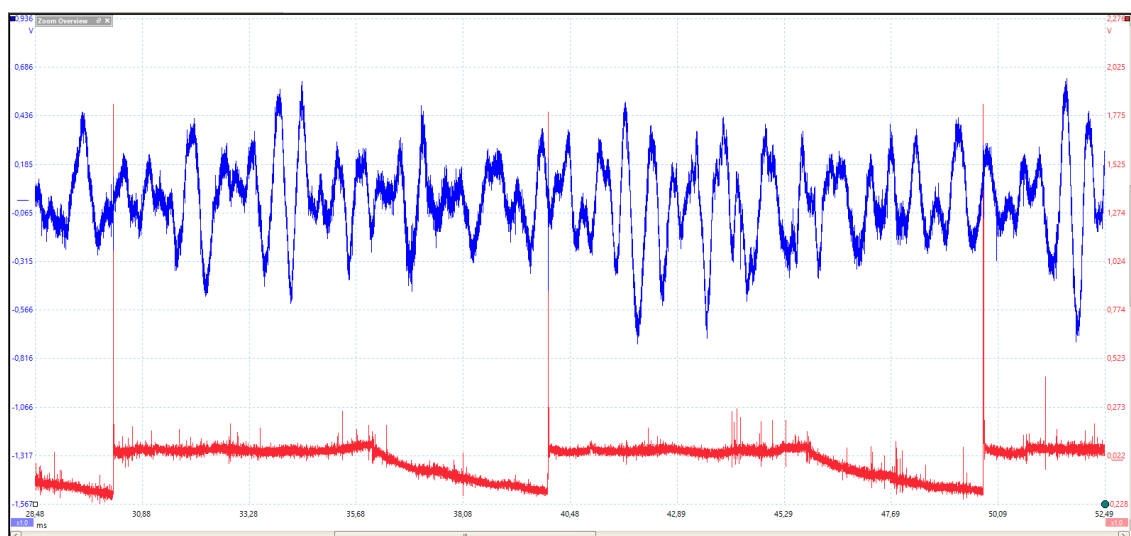


Figura 38 - Sinal captado pelo PicoScope.

A Figura 38 é um exemplo das imagens que são fornecida pelo *PicoScope*. Os picos existentes na onda azul correspondem à amplitude da oscilação vibratória captada pelo sensor de detonação durante o funcionamento do motor. Para ser possível identificar e limitar um ciclo de funcionamento do cilindro do motor foi introduzido no tambor do motor um VRS, tal como explicado anteriormente. Este sensor permite saber quando o êmbolo se encontra no PMS do cilindro. No *PicoScope* a onda gerada pelo VRS é a onda que se encontra graficamente representada pela cor vermelha, na Figura 38. Os picos obtidos do VRS são tomados em consideração para efetuar o cálculo da frequência e da rotação de funcionamento do motor, para esse cálculo foi tomado como referência o tempo compreendido entre três picos desse sinal, isto porque 3 picos do VRS correspondem a um ciclo completo por parte de um cilindro dos cilindros do motor, pois durante um ciclo o pistão passa três vezes pelo PMS do seu cilindro.

Analizando o tempo compreendido entre esses picos do VRS e a forma do sinal gerada pelo sensor de detonação, é possível estabelecer uma comparação com os outros sinais captados a diferentes valores de rotação. Com esta comparação é-nos possível observar se existe ou não o fenómeno de detonação no motor durante o seu funcionamento.

A fórmula que nos permite saber o tempo (em segundo) de um ciclo de funcionamento de um cilindro é dada pela seguinte equação:

$$\Delta T = t_f - t_i \quad (3.1)$$

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Onde:

$\Delta T \rightarrow$ período de tempo [s] correspondente a 1 ciclo de funcionamento de um cilindro

$t_f \rightarrow$ tempo final [s]

$t_i \rightarrow$ tempo inicial [s]

A equação utilizada para calcular a frequência relativa ao funcionamento de um ciclo de um cilindro é a seguinte:

$$f = \frac{1}{\Delta T} \quad (3.2)$$

Onde:

$f \rightarrow$ frequência [Hz]

$\Delta T \rightarrow$ período de tempo [s] correspondente a 1 ciclo de funcionamento do cilindro

Sabendo a frequência e o intervalo de tempo de um ciclo de funcionamento podemos calcular a sua frequência angular, esta pode ser obtida pelas seguintes fórmulas:

$$w = \frac{2 * \pi}{\Delta T} \quad (3.3)$$

Ou ainda,

$$w = 2 * \pi * f \quad (3.4)$$

Onde:

$w \rightarrow$ frequência angular [rad/s]

$\Delta T \rightarrow$ período de tempo [s] correspondente a 1 ciclo de funcionamento do cilindro

$f \rightarrow$ frequência [Hz]

O valor da rotação por minuto [*rpm*] é obtido pela seguinte fórmula:

$$rpm = \frac{w * 60}{2 * \pi} \quad (3.5)$$

Ou ainda,

$$rpm = \frac{2 * \pi * f * 60}{2 * \pi} \quad (3.6)$$

Onde:

rpm → rotações por minuto

w → frequência angular [rad/s]

f → frequência [Hz]

Na realização da parte laboratorial no motor *LOMBARDINI* (ver Figura 39) foi utilizado como combustível o gasóleo, sem uma carga dinâmica e sem alterações no ponto de injeção do motor. Os ensaios consistiram em duas corridas ao longo das rotações do motor durante o seu período de funcionamento. Começou-se então com a captação dos sinais recolhidos pelo sensor de detonação e pelo VRS quando o motor se encontrava a funcionar ao ralenti e depois foi-se subindo o valor da rotação.

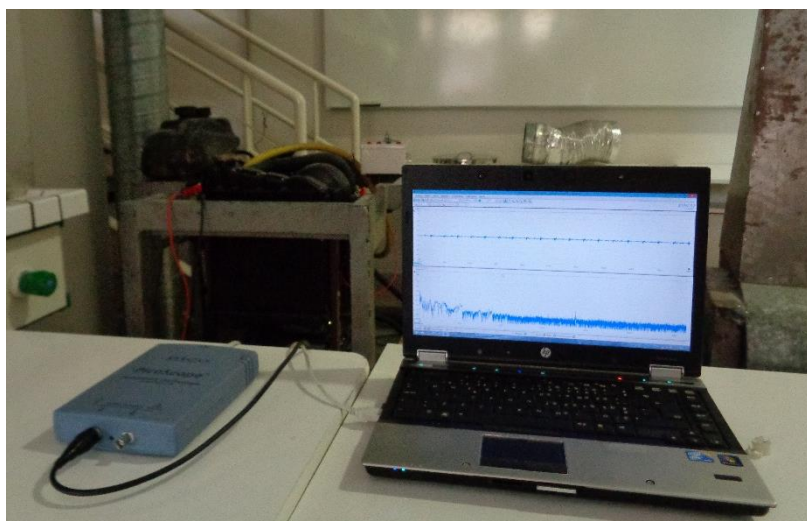


Figura 39 - Banco de ensaios motor *LOMBARDINI* LDW 502.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Para que fosse possível realizar as medições das rotações por minuto, foi necessária a colaboração do Orientador, que foi variando a posição do acelerando do motor para que se conseguisse obter rotações diferentes (ver Figura 40).

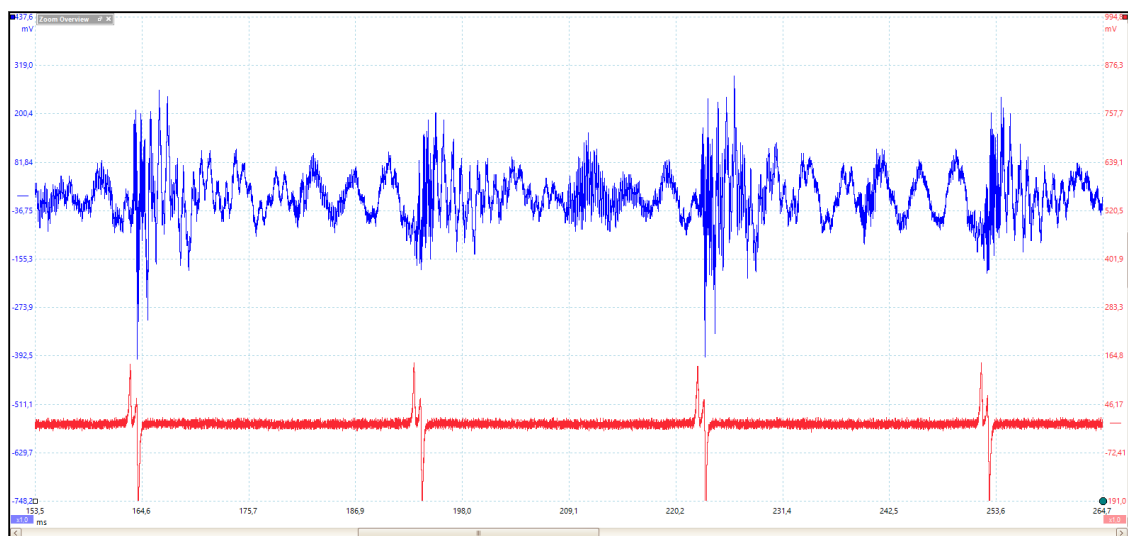


Figura 40 - Sinais captados pelo PicoScope.

Na Figura 40 é possível observar duas ondas distintas, a onda azul corresponde a onda vibratória que é captada pelo sensor de detonação, enquanto a onda vermelha indica-nos quando o pistão se encontra no PMS do cilindro.

Após a captação dos sinais do sensor de detonação e de VRS para as diferentes posições do acelerador do motor procedeu-se à análise das imagens recolhidas por parte do *PicoScope*. Com estas informações é possível calcular a frequência e a rotação do motor, permitindo ter uma perceção em que altura a combustão ocorre.

Nos ensaios realizados no motor *HONDA* foi utilizado como combustível gasolina sem-chumbo 95, foi também aplicada uma carga dinâmica através da utilização do travão e limitou-se o funcionamento do motor às 3000 *rpm*. Tendo definidas estas condições o trabalho experimental consistiu na realização de várias corridas ao longo das rotações do motor desde as rotações mais elevadas até este entrar nas suas rotações de ralenti, variando o avanço da ignição do motor. De maneira a conseguir realizar esta experiência laboratorial primeiramente foi necessário redefinir o mapa de injeção do motor dado que este tinha um mapa de injeção com uma mistura mais pobre que a razão estequiométrica ar/combustível e o motor não conseguia funcionar. Substitui-se o mapa de injeção para um mapa de acordo com a razão estequiométrica de ar/combustível, o qual é apresentado no Anexo B [33].

Substituído o mapa de injeção na centralina do motor por um mapa de injeção para uma mistura mais rica que a anterior, o motor começou a funcionar de acordo com o pretendido. Depois do motor estar a funcionar de acordo com o pretendido, passou-se à alteração no sistema de

ignição, isto é, a mudança de um sistema de ignição por magneto para um sistema de ignição eletrónico. Com a utilização deste último sistema de ignição foi possível controlar o AI eletronicamente através do uso da centralina. Este motor possui dois disparos de faísca por ciclo, sendo o primeiro relativo ao período de combustão e o segundo disparo ao período de escape.

O procedimento utilizado para realizar a alteração no tipo de ignição foi a colocação de outra vela de ignição na parte exterior do motor (ver Figura 41), comandada eletronicamente pela centralina *Haltech E6H*, e foi-se variando os ângulos de AI na centralina até que os disparos das velas fossem coincidentes.

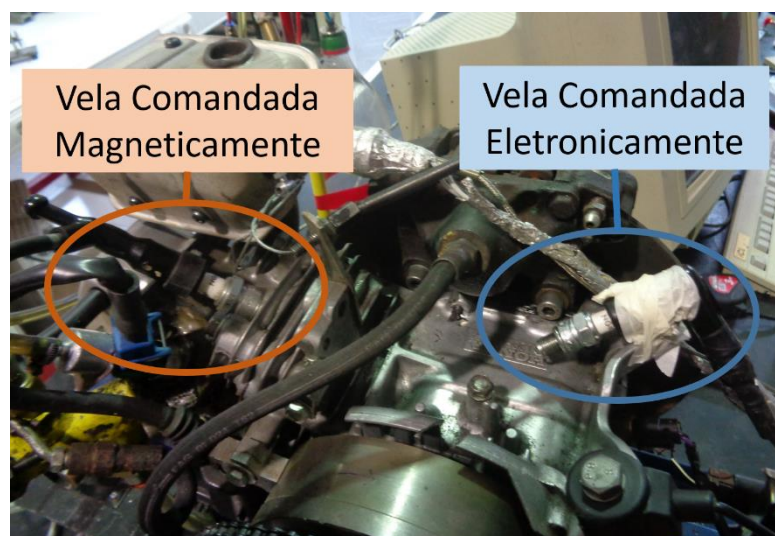


Figura 41 - Procedimento para a troca de tipo de ignição.

A forma utilizada para verificar quando estes picos elétricos se aproximavam ou igualavam foi utilizado o *PicoScope 6 Automotive* e o seu menu de ignição, como apresentado na Figura 42.

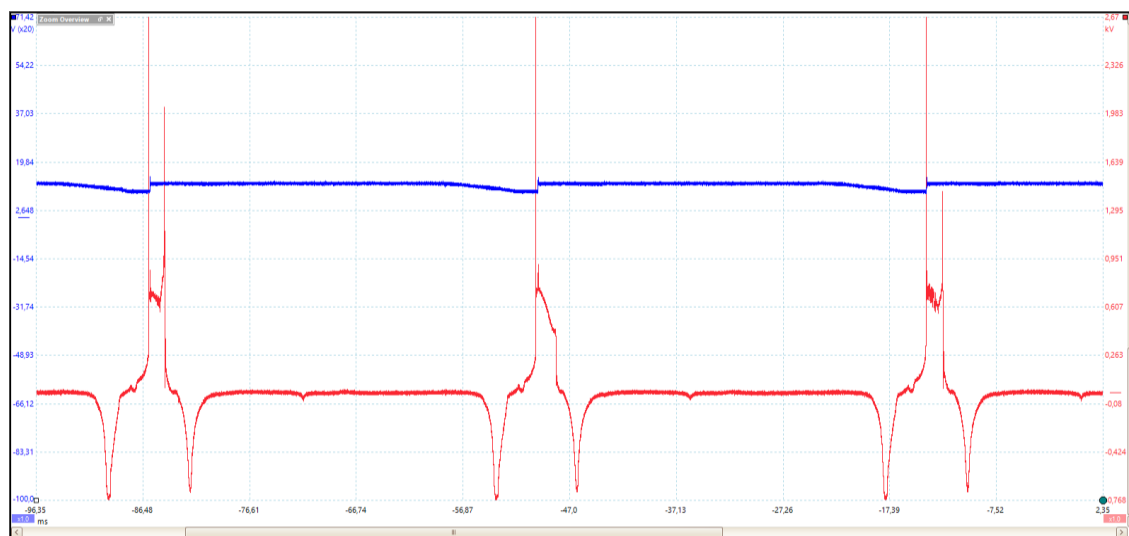


Figura 42 - Acerto da ignição.

Como podemos verificar na Figura 42 temos duas ondas distintas, a azul temos a linha que corresponde a ignição por ação de magneto, e a linha vermelha corresponde a ignição por ação eletrónica, como podemos observar estas linhas tem o seu pico elétrico quase em simultâneo, isto quer dizer que ambas as faíscas estão a disparar ao mesmo tempo. Esta situação acontece quando o avanço de ignição por magneto está fixo em 20° antes do PMS, valor indicado pelo fabricante, e o avanço de ignição por ação eletrónica se encontra nos 80° antes do PMS (este ângulo não corresponde ao avanço de ignição, mas sim ao ângulo correspondente à colocação do íman para acionamento do sensor de Hall). Estando este acerto de ignição realizado é possível então proceder à troca do tipo de ignição para a ignição eletrónica, para que seja possível controlar o AI através do uso da centralina, o que nos permitir realizar os ensaios experimentais pretendidos.

Foi necessário trocar também a bobine utilizada pois a bobine existente estava defeituosa, não permitindo o funcionamento com ignição eletrónica.

Depois destas alterações no motor *HONDA* (ver Figura 43) foram realizadas duas corridas ao longo das rotações do motor para cada ângulo de AI analisado, rotações que iam desde a borboleta completamente aberta até a borboleta completamente fechada. Os ângulos de AI analisados vão desde dos 10° até aos 75° .

Para conseguir fazer a medição das rotações foi necessária a colaboração do Orientador que foi alterando a posição do acelerador do motor de modo a ter-se rotações diferentes.

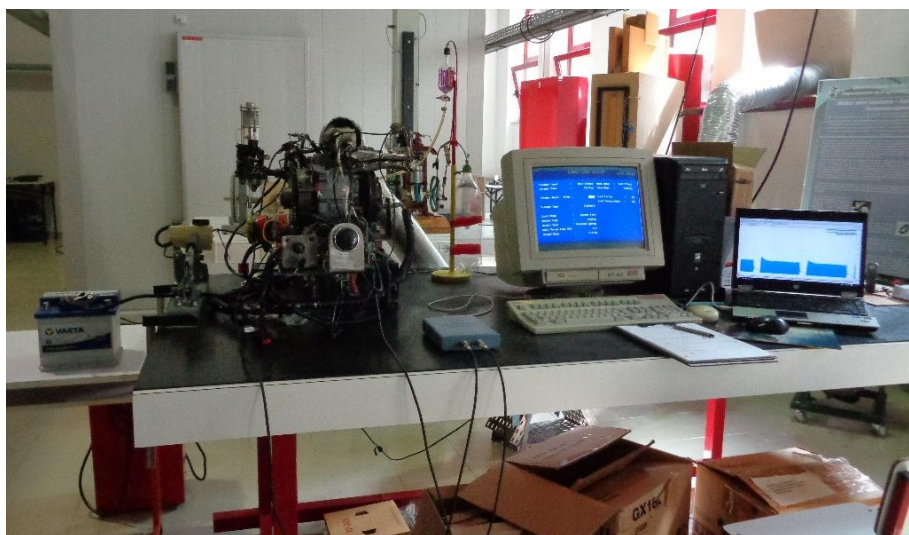


Figura 43 - Banco de ensaios motor HONDA GX 120.

Depois de se ter realizado a captação dos valores de rotação do motor em diferentes posições do acelerador, procedeu-se à análise das imagens recolhidas pelo *PicoScope* (ver Figura 44),

fez-se então uma tabela onde se registou as frequências relativas a cada um dos ciclos de funcionamento do motor.

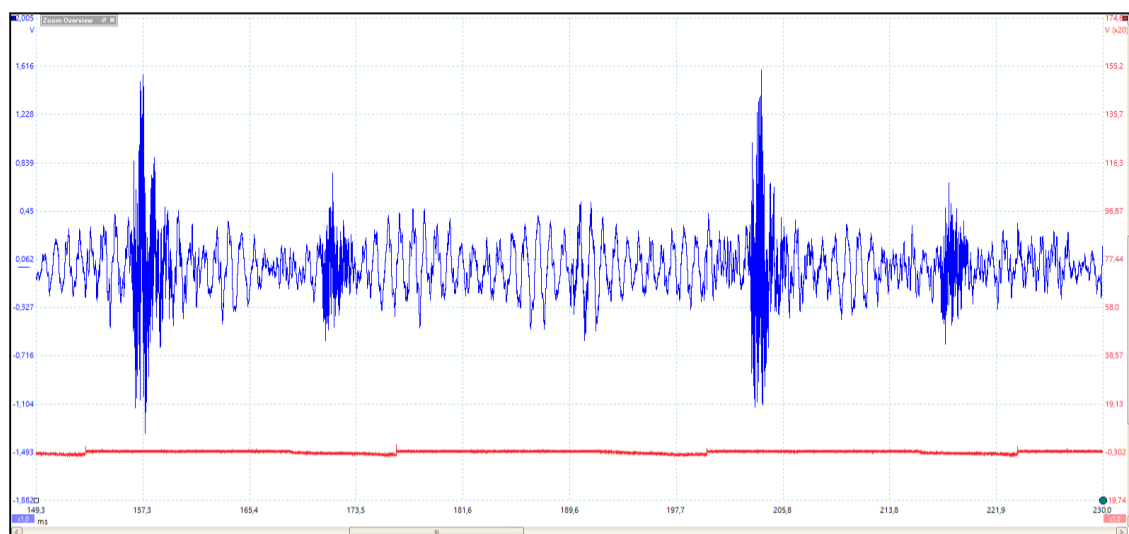


Figura 44 - Sinais captados pelo PicoScope.

Na Figura 44 é possível observar duas ondas distintas, a onda azul corresponde à onda vibratória que é captada pelo sensor de detonação, enquanto a onda vermelha indica quando se dá a faísca, esta informação é recolhida pelo sensor de tensão no cabo que liga a bobine de ignição à massa. Com esta informação é possível calcular a frequência e a rotação do motor, sendo depois possível calcular o posicionamento do PMS e ter a perceção da altura em que acontece a combustão.

Como referido anteriormente, realizou-se uma alteração no sistema de ignição do motor, a Tabela 3 apresenta as correspondências estabelecidas entre o AI eletrónico com o AI para a realização dos ensaios.

Tabela 3 - Correspondência dos AI eletrónico com os AI eletromagnéticos.

Haltech E6H	AI	Início Janela		Fim Janela	
90°	10°	20°	0,349 rad	80°	1,396 rad
80°	20°	30°	0,524 rad	90°	1,571 rad
70°	30°	40°	0,698 rad	100°	1,745 rad
60°	40°	50°	0,873 rad	110°	1,920 rad
50°	50°	60°	1,047 rad	120°	2,094 rad
40°	60°	70°	1,222 rad	130°	2,269 rad
30°	70°	80°	1,396 rad	140°	2,443 rad
25°	75°	85°	1,484 rad	145°	2,531 rad
20°	80°	90°	1,571 rad	150°	2,618 rad

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Na primeira coluna estão apresentados os valores dos ângulos de AI que foram inseridos no modo *online* na centralina *Haltech E6H*, na coluna seguintes estão indicados os ângulos de AI, na terceira e quarta coluna estão indicados os ângulos de início e fim da janela de detonação com as unidades em graus e radianos. Estes ângulos de início e fim de janela são importantes e são tidos em consideração para ser possível comparar um caso sem detonação com o caso com possível detonação. Esta janela está situada entre os 10° e os 70° logo após o segundo PMS do ciclo, sendo tudo o resto considerado ruído e não interessando para a análise da ocorrência de detonação [26].

Ao sabermos o AI é-nos possível saber o momento exato onde se encontra o PMS ao longo do sinal obtido durante a medição, isto pois segundo a Figura 9 sabemos que o PMS se encontra depois do ângulo de AI.

Sabendo então os PMS ao longo de um ciclo de funcionamento do motor conseguimos saber também quando é que a AVA, o FVA, a AVE e o FVE. Sabemos de estudos anteriormente, que no motor *HONDA GX 120*, a AVE inicia-se aos 423° após o primeiro PMS do ciclo e o FVE acontece completamente aos 73° do primeiro PMS; por sua vez a AVA acontece aos 660° do primeiro PMS e o FVA ocorre aos 263° do primeiro PMS [34]. Na Figura 45 estão identificadas todas as posições relevantes ao longo de um ciclo, posições como as dos PMS, a AVA, o FVA, a FVA, o FVE, o IJD e o FJD.

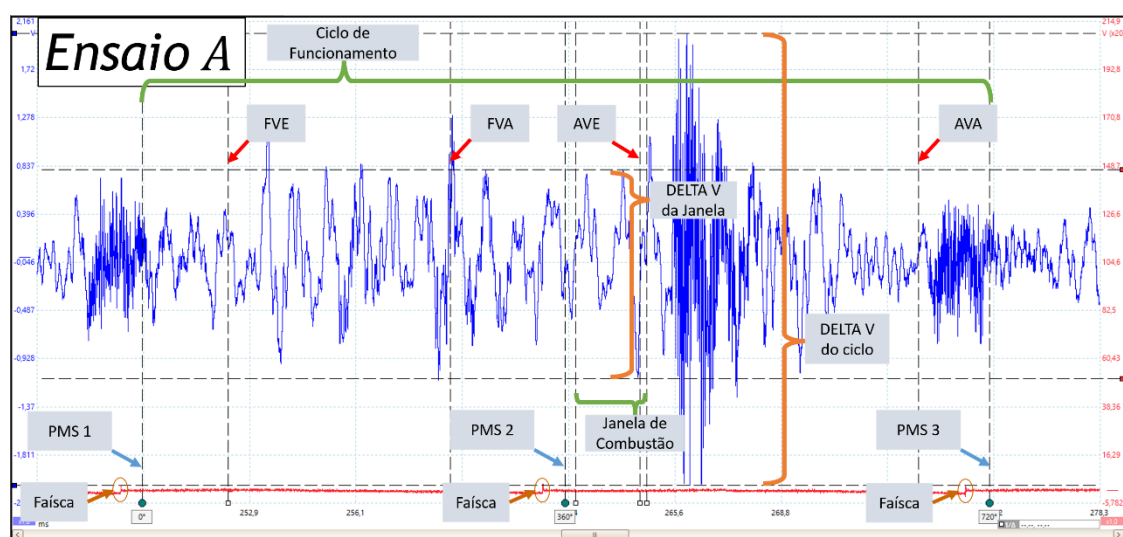


Figura 45 - Legenda do funcionamento de um ciclo no motor HONDA.

Com estas informações é possível compreender o porquê de algumas das vibrações ocorrerem ao longo do espaço de tempo que é identificado na Figura 45.

3.3.1 Problemas e Soluções Encontradas

Ao longo da realização desta atividade experimental foram aparecendo alguns problemas à realização desta, problemas que de uma forma ou de outra influenciavam quer o funcionamento dos motores, quer a recolha e análise dos dados, afetando desta forma os resultados obtidos.

A primeira parte da experiência foi realizada no motor da *OPEL* que se encontra no LEMT do DEM. Para a utilização deste motor de acordo com o que era pretendido para a realização da experiência foi necessário limpar o reservatório de água que é utilizado para alimentar e controlar o freio do banco de ensaios onde o motor está instalado. Foi necessária esta limpeza para que a água que é utilizada para controlar o freio do motor não tivesse qualquer detrito que impedisse o bom controlo do motor e levasse à existência de flutuações nos valores da rotação durante os ensaios.

Outro problema que surgiu no decorrer da realização dos ensaios consistiu na recolha dos dados por parte do sensor de detonação. Primeiramente nos ensaios experimentais no motor *OPEL* e no motor *LOMBARDINI*, utilizou-se apenas o sensor de detonação (ver Figura 46).

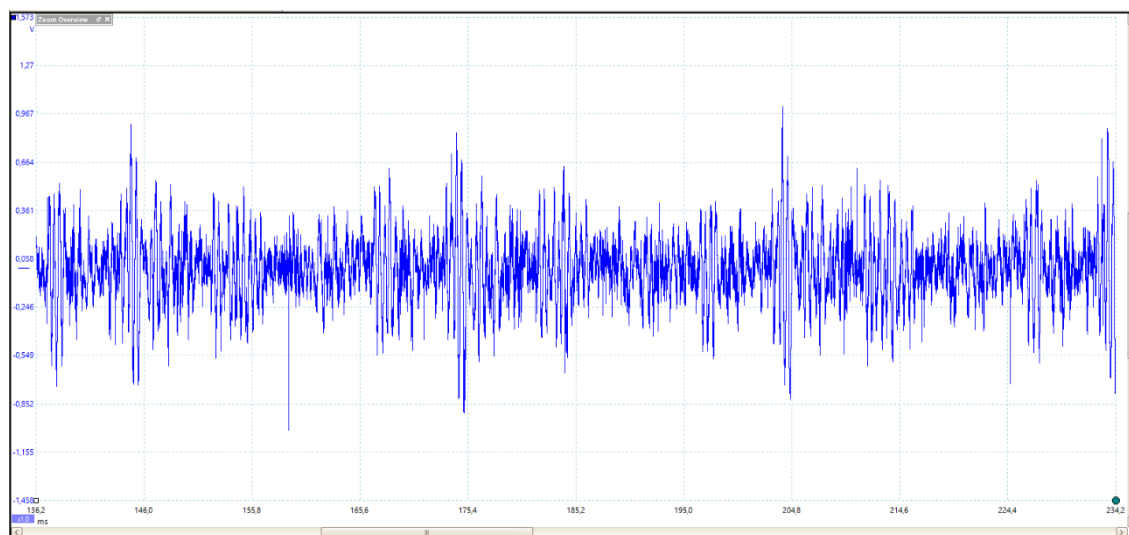


Figura 46 - Sinal captado pelo PicoScope sensor de detonação.

Na Figura 46 podemos observar a onda vibratória referente ao funcionamento do motor durante uma dada rotação. Como é possível observar não é muito claro quando um ciclo de funcionamento de um cilindro acaba e começa outro ciclo, influenciando desta forma a obtenção de um valor viável para a frequência de funcionamento do motor.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

A solução encontrada e utilizada para que fosse possível encontrar e delimitar o intervalo de tempo decorrente de um ciclo de funcionamento foi a introdução do sensor VRS nos ensaios experimentais a realizar nestes motores.

Com a introdução do VRS na realização dos ensaios foi possível restringir a análise e medição dos valores da frequência a um intervalo de tempo para cada ciclo de funcionamento do motor, pois este sensor imite um pico elétrico, captado pelo *PicoScope* aquando da passagem do PMS de um cilindro pela parte superior do cilindro (ver Figura 47).

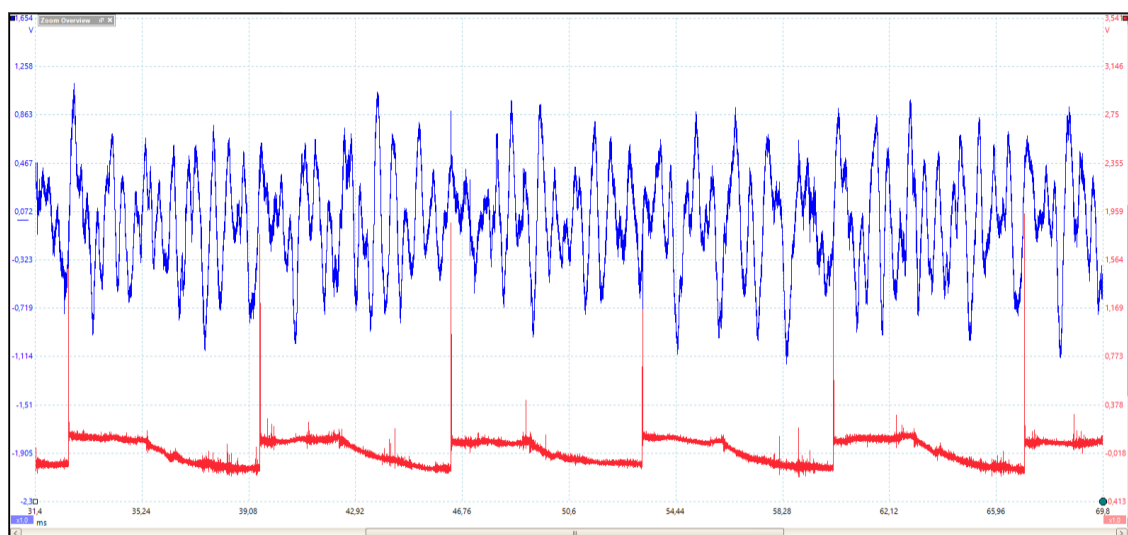


Figura 47 - Sinal captado pelo *PicoScope* sensor de detonação mais VRS.

Desta forma restringimos a análise do sinal recebido do sensor de detonação ao intervalo de tempo compreendido entre três picos elétricos captados pelo sensor VRS.

Na parte experimental realizada no motor *HONDA* foi onde apareceram mais problemas, e sendo esta a parte mais revelante desta dissertação foi esta também a que ocupou mais tempo e se demonstrou a mais demorada. Este motor é importante para esta dissertação pois a sua centralina programável, e o seu modo *online*, possibilita alterar/ajustar certos parâmetros do funcionamento do motor de modo a recolher os dados que pretendemos ou mesmo adaptar o funcionamento do motor ao pretendido, tudo isto enquanto o motor está em pleno funcionamento.

Após a colocação do sensor de detonação no motor, verificou-se que o motor não conseguia entrar em funcionamento devido a consequências de ensaios realizados anteriormente neste motor. O esquema na Figura 48 pretende identificar e esclarecer quais os problemas que foram encontrados, quais as soluções que foram implementadas e se estas se tornaram ou não soluções viáveis para o problema encontrado.

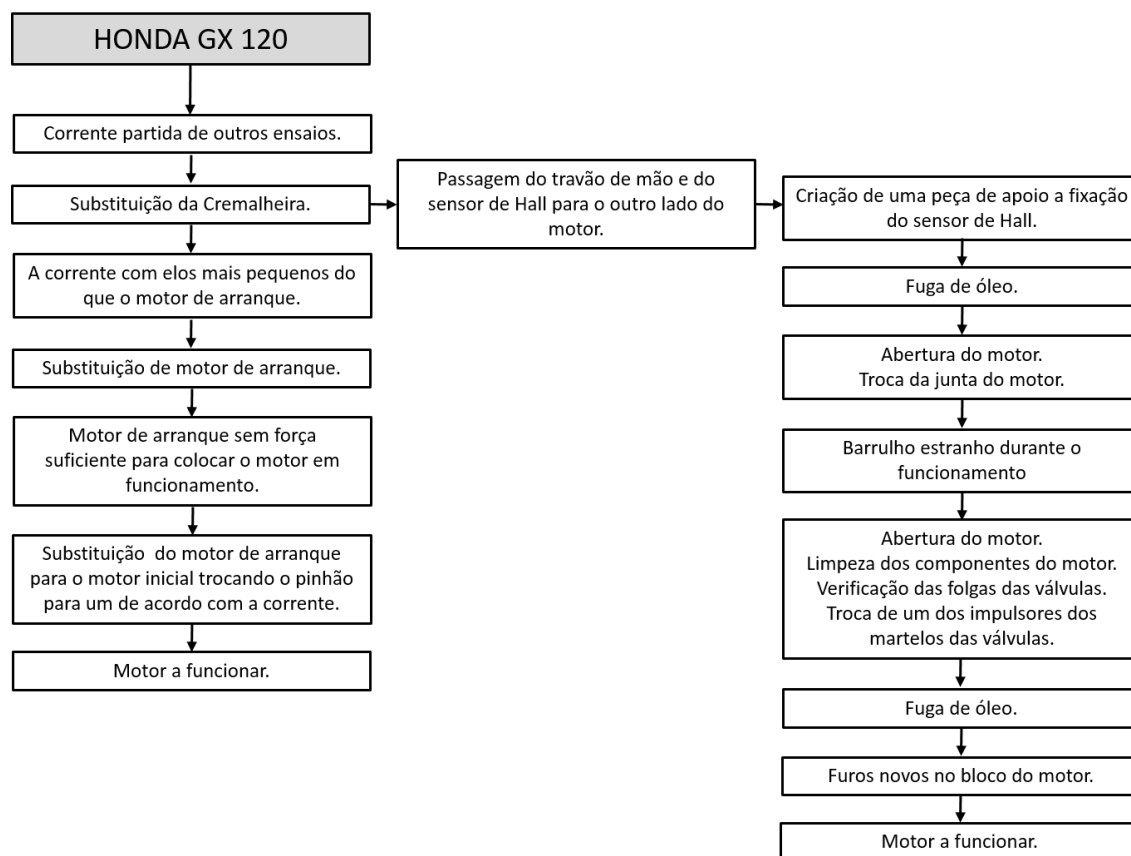


Figura 48 - Problemas e soluções encontradas motor HONDA GX 120.

Como demonstrado no Figura 48, um dos primeiros problemas depreendeu-se com o facto de que a corrente que era utilizada para ligar o motor de arranque à cremalheira do motor se encontrava partida. Procedeu-se então à substituição da corrente, cremalheira e de motor de arranque para uma cremalheira utilizada num motor igual mas de origem.

Após esta substituição, verificou-se que esta iria conduzir a outros problemas, primeiramente ter-se-ia de passar o sensor de Hall para o outro lado do motor e em seguida trocar o pinhão do motor de arranque, visto que a nova corrente tinha passo mais pequeno. Para a substituição da corrente optou-se pela alteração do motor de arranque pelo motor de arranque original para este tipo de motor, contudo esta opção não se tornou viável pois o motor de arranque não conseguia produzir energia suficiente para colocar o motor em funcionamento (relação de transmissão incorreta), levando assim a outro problema. O problema do motor de arranque foi solucionado pela utilização do motor de arranque que estava inicialmente montado no banco de ensaios, substituindo apenas o pinhão deste para um pinhão de acordo com as características da corrente, verificando-se então que este motor de arranque já conseguia produzir energia para por o motor a funcionar na sua normalidade.

A passagem do sensor de Hall para o lado oposto do inicial levou a que fosse necessário fazer uma nova peça para suportar e ajustar este sensor, bem como realizar o ajuste das posições

Detecção de Detonação em Motores de Pistão

dos ímanes de forma que a leitura dos pólos pelo sensor de Hall funcionasse na sua normalidade. Após a realização da peça de suporte foi necessário fixar esta peça ao motor. A solução encontrada foi fixar o suporte do sensor de Hall ao motor recorrendo aos parafusos inferiores da tampa do óleo do motor. Contudo, ao utilizar estes parafusos verificamos que existia uma fuga de óleo devido às folgas criadas na junta do motor. Para colocar o sensor de Hall a funcionar normalmente procedeu-se à substituição dos ímanes por uns novos e à alteração da sua posição na peça que fornece a informação do funcionamento do motor ao sensor de Hall, onde o íman com o pólo Norte voltado para o sensor de Hall dá a informação de “reset” ao circuito e o íman com o pólo Sul virado para o sensor dá a informação à centralina de “trigger” do circuito (ver Figura 49).

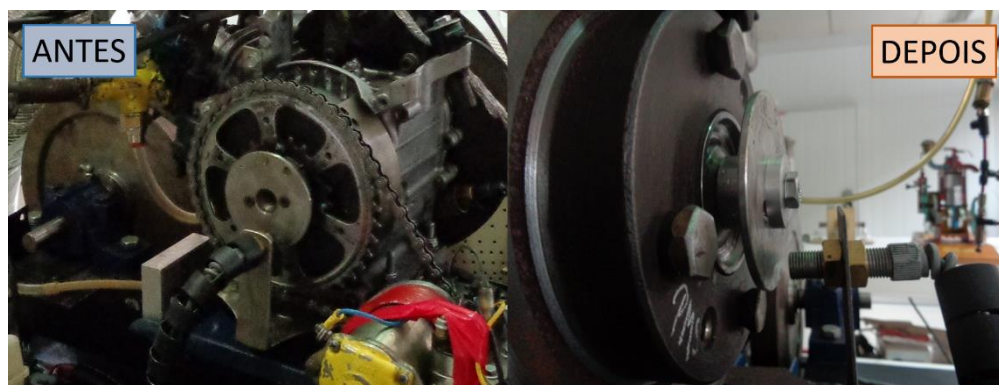


Figura 49 - Posicionamento do sensor de Hall antes e depois dos ajustes no motor HONDA.

Ao verificarmos a existência da fuga de óleo do motor, proceder-se à sua abertura para trocar a junta do motor por uma junta nova, porém esta troca veio a verificar-se inútil pois o motor continuava a ter fuga de óleo devido à presença da peça de suporte do sensor de Hall que não permitia o melhor aperto aos parafusos.

Efetuada o estancamento da fuga de óleo do motor com silicone de juntas, o motor foi colocado em funcionamento e foi detetado um barulho estranho durante o seu funcionamento. Depois da verificação de todos os componentes exteriores do motor, como a cremalheira, sistema de travagem e o sistema de suporte e de ajuste do sensor de Hall, pensou-se então que o problema estaria dentro do motor. Para descobrir a origem do barulho do motor procedeu-se à abertura do motor e à limpeza total do mesmo, desde do pistão do motor, passando pela limpeza do cilindro, pela cambota, pela sua árvore de cames e pelos impulsos dos martelos das válvulas, pela limpeza do injetor e a verificação dos cabos de ligação entre o injetor e a centralina, a verificação da folga da válvula de admissão, da válvula de escape e da vela de ignição. Durante esta limpeza ao motor verificou-se a existência de um impulsor do martelo empenado e procedeu-se então a sua substituição (ver Figura 50). Depois deste procedimento tornou-se a fechar o motor e preparou-se o mesmo para a realização dos ensaios.



Figura 50 - Motor HONDA GX 120 aberto.

Depois de fechado o motor entrou em funcionamento, no entanto, este ainda continuava a verter óleo, pois um dos parafusos do cárter tinha a rosca moída. A solução encontrada para travar a fuga de óleo foi alargar o furo no bloco do motor e roscá-lo, de maneira a ser possível substituir o parafuso anterior por outro maior de maneira a garantir que o aperto necessário para suportar a peça do sensor de Hall era garantido, bem como o aperto necessário para a fuga de óleo estancar. Logo após a realização desta operação o motor ficou pronto a funcionar sendo possível passar para a realização dos ensaios práticos que se pretendia executar no motor *HONDA GX 120*.

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios efetuados nos diferentes tipos de motores referidos à cima, consoante os pressupostos definidos aquando a realização dos ensaios.

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos no motor *OPEL*, depois os resultados obtidos no motor *LOMBARDINI* e por fim serão apresentados os resultados relativos ao motor *HONDA*. Ao longo da apresentação dos resultados estes serão examinados e comparados consoante alguns critérios, tais como, a velocidade de rotação do motor verificada num determinado funcionamento do motor e o avanço de ignição registado no seu funcionamento.

Todos os resultados apresentados foram obtidos recorrendo ao *software PicoScope 6 Automotive* e às folhas de cálculo do *Microsoft Office Excel*.

4.1 OPEL ASTRA 1.4i

Como referido anteriormente na descrição da atividade experimental de modo a que seja possível identificar o início e o fim do ciclo foi instalado no motor um VRS, que a cada passagem do êmbolo no PMS de um cilindro emite um pico de tensão, como se pode verificar na Figura 47.

Na Figura 47 a onda azul corresponde ao sinal recolhido pelo sensor de vibração, por outro lado a onda de cor vermelha corresponde ao sinal captado pelo *PicoScope* do VRS.

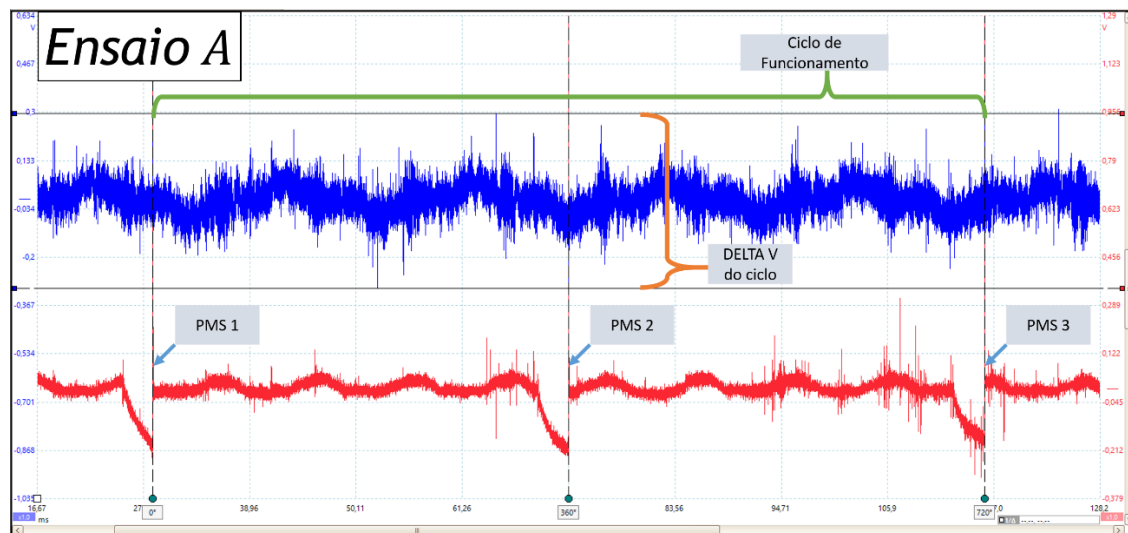


Figura 51 - Legenda de um ciclo de funcionamento do motor OPEL.

Na Figura 51 está representado um ciclo de funcionamento do motor *OPEL*, e de forma a ser mais simples e mais claro analisar e estabelecer futuras comparações com outros valores de rotação, foram usadas algumas guias. As guias utilizadas são referentes às localizações dos PMS ao longo de um ciclo de funcionamento do motor, estas guias estão identificadas como PMS 1, PMS 2 e PMS 3, sendo o PMS 1 o correspondente ao início do ciclo e o PMS 3 o correspondente ao PMS do fim do ciclo. Foram usadas outras guias que permitiram auxiliar o cálculo da amplitude de vibração no motor para uma dada rotação, esta amplitude está identificada na imagem com o quadrado da legenda que diz “DELTA V do ciclo”. Por sua vez a chave de cor verde corresponde ao intervalo de tempo do funcionamento do ciclo do motor, como se pode verificar pela legenda, “Ciclo de Funcionamento”.

Com o recurso às guias conseguimos então estabelecer uma comparação entre os vários ensaios realizados. Conseguimos comparar não só o intervalo de tempo dum ciclo de funcionamento do motor, bem como a amplitude de vibração do motor durante o seu período de funcionamento e assim verificar se existe alguma alteração no comportamento da vibração no motor quando se dá a combustão. Esta alteração na amplitude de vibração relativa ao fenómeno de combustão pode ser verificada pouco antes do PMS 2 e pode-se prolongar até ao final da fase de expansão do ciclo do motor, isto é, perto do PMI que acontece logo após o PMS 2. Na Figura 52 estão apresentados os gráficos recolhidos dos ensaios laboratoriais no banco de ensaios do LEMT.

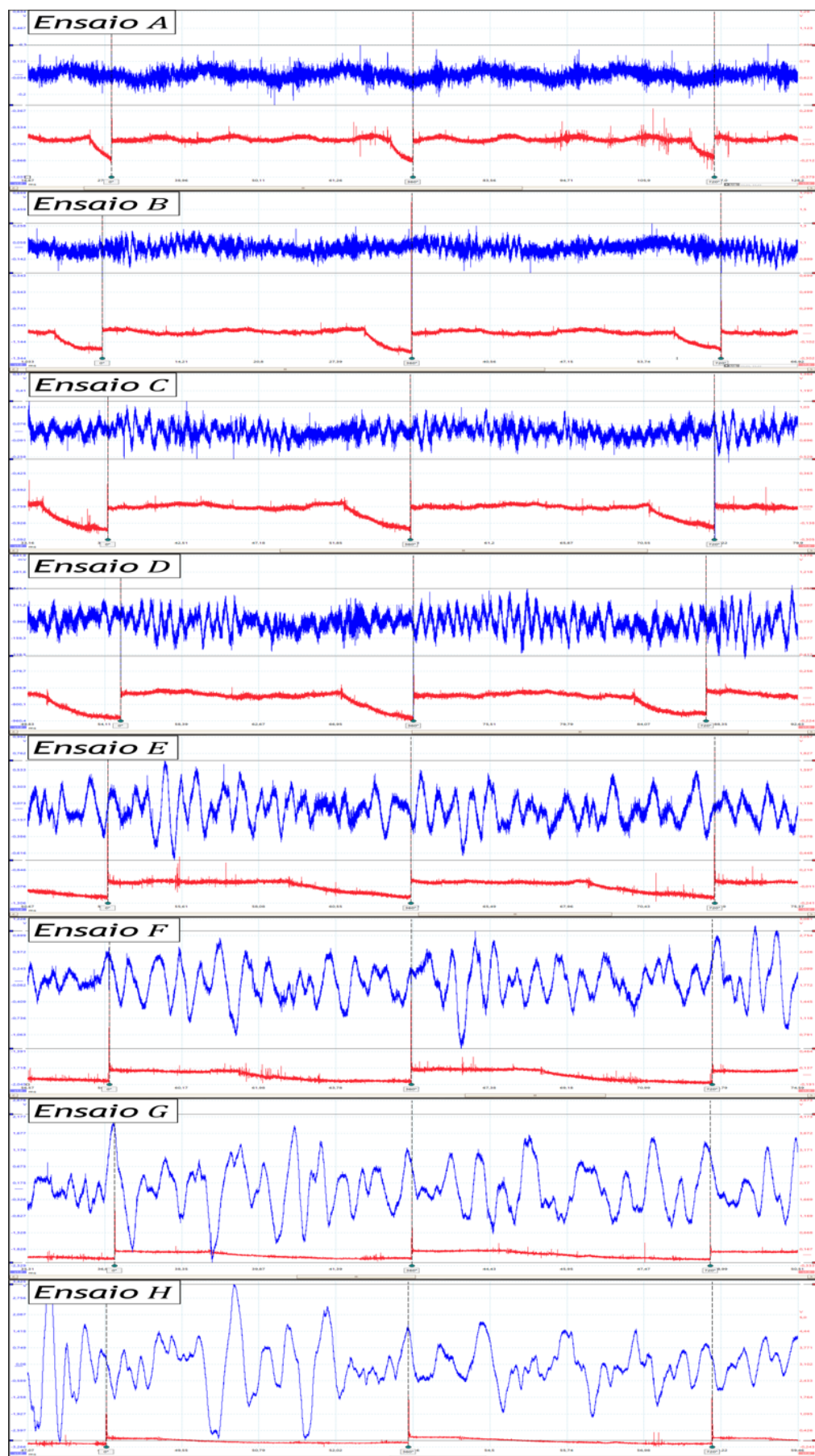


Figura 52 - Ensaio no motor OPEL.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Na Tabela 4 estão apresentados os valores da rotação, do intervalo de tempo de funcionamento de um ciclo neste motor, da frequência relativa ao seu período de funcionamento e os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 4 - Ensaios no motor OPEL.

Ensaio	Rotação [<i>rpm</i>]	Funcionamento do Ciclo [<i>s</i>]	Frequência [<i>Hz</i>]	Amplitude Vibração do Ciclo [<i>V</i>]
Ensaio A	689	0,0873	11,5	0,60
Ensaio B	1131	0,0530	18,8	0,61
Ensaio C	1571	0,0368	26,2	0,53
Ensaio D	1897	0,0325	31,6	0,66
Ensaio E	3083	0,0195	51,4	1,38
Ensaio F	4240	0,0141	70,7	2,32
Ensaio G	5103	0,0118	85,0	4,49
Ensaio H	6123	0,0098	102,0	6,30

Estes valores são relativos aos gráficos dos ensaios apresentados na Figura 52. No motor *OPEL* foram realizados ensaios para as 689/ 1003/ 1131/ 1379/ 1571/ 1897/ 3083/ 3524/ 4240/ 4562/ 5103/ 5718/ 6123 *rpm*. Para cada um destes ensaios foram realizadas oito medições diferentes, depois foram registados os valores médios de forma a ser possível obter um valor médio para rotação e para frequência de cada ensaio, sabendo os valores médios foi escolhido um ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio de cada ensaio. Para consultar a totalidade dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C1 desta dissertação.

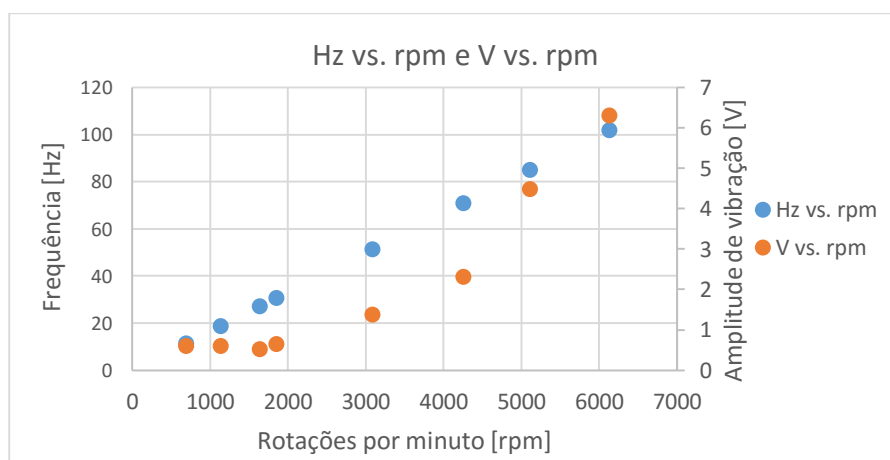


Figura 53 - Gráfico dos ensaios realizados no motor OPEL.

Na figura 53 estão representados os ensaios para as *rpm* de 1000 em 1000 *rpm*, percorrendo desta maneira todas as rotações possíveis durante o funcionamento do motor *OPEL*, desde que este está ao ralenti até que atinge os valores de rotação por minuto mais elevados. Recorrendo a Tabela 4 e às Figuras 52 e 53 podemos concluir que a amplitude de vibração do motor nas rotações mais baixas tem valores aproximados, subindo esses valores quando o motor regista *rpm* da ordem das 2500 *rpm*. A partir das 2500 *rpm* os valores da amplitude de vibração vão subindo com o aumento da rotação do motor, tendo o valor de 6,30 V quando o motor regista as 6123 *rpm*.

4.2 LOMBARDINI LDW 502

Durante a descrição da atividade experimental foi referido que uma das maneiras de identificar o início e o fim do ciclo foi através da instalação no motor de um sensor VRS, pois este sensor a cada passagem do pistão no PMS de um cilindro emite um pico elétrico.

Na figura 54 está apresentado uma imagem retirada do *software* informático *PicoScope* durante a análise de um ciclo de funcionamento do motor *LOMBARDINI*. Na Figura 54 vemos dois sinais distintos, o sinal a azul corresponde ao sinal recolhido pelo sensor de vibração, o sinal de cor vermelha é correspondente ao sinal do VRS.

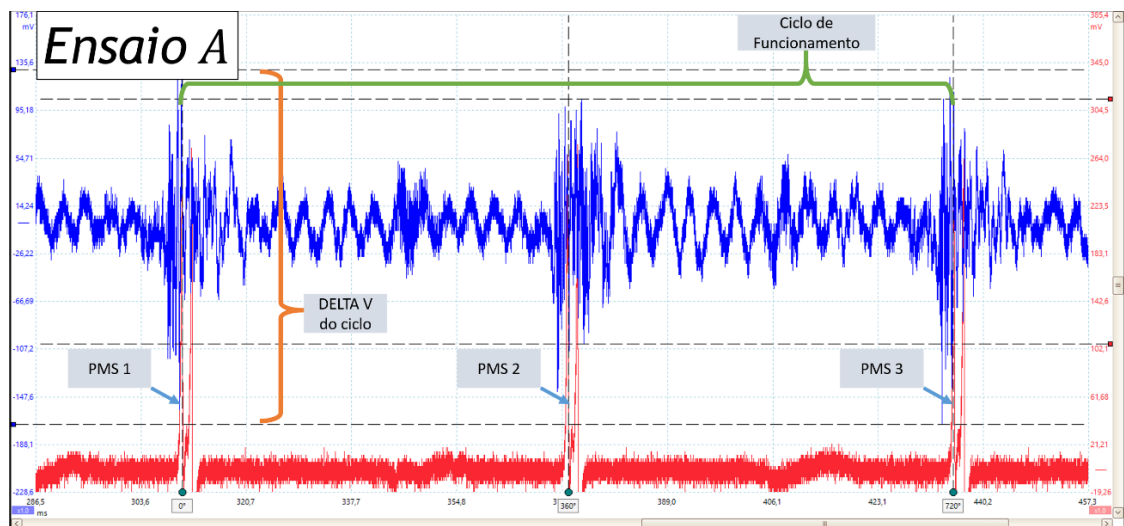


Figura 54 - Legenda de um ciclo de funcionamento do motor *LOMBARDINI*.

Tal como no motor *OPEL*, também foram utilizadas algumas guias, que localizam os PMS ao longo do ciclo de funcionamento do motor, ver Figura 54. As referidas guias estão apresentadas e identificadas na Figura 54 com a legenda correspondente a PMS 1, PMS 2 e PMS 3, sendo que

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

o PMS 1 corresponde ao PMS do início do ciclo e o PMS 3 o correspondente ao PMS do fim do ciclo. Foram usadas outras guias que permitiram auxiliar o cálculo da amplitude de vibração no motor ao longo do ciclo de funcionamento, amplitudes representadas pela chaveta de cor vermelha.

Com o recurso às guias conseguimos então estabelecer uma comparação entre os vários ensaios realizados. Tal como aconteceu na análise dos resultados do motor *OPEL*, conseguimos estabelecer uma comparação com os intervalos de tempo correspondentes a um ciclo de funcionamento do motor, bem como a amplitude de vibração correspondente a esse período e ainda se existe alguma alteração no comportamento da vibração no motor aquando da combustão. Esta alteração na amplitude de vibração relativa ao fenómeno de combustão pode ser verificada um pouco antes do PMS 2 e pode-se prolongar durante a fase de expansão do ciclo do motor, isto é, até perto do PMI que acontece depois do PMS 2.

Após a recolha dos dados obtidos pelo *PicoScope* e feito o devido tratamento da sua informação nas folhas de cálculo do *Microsoft Office Excel*, é possível criar os gráficos que necessitamos para observar o comportamento da amplitude da vibração ao longo das várias rotações que foram testadas nos vários ensaios experimentais.

A Figura 55 apresenta uma sequência de gráficos das vibrações que foram recolhidas nos ensaios laboratoriais no banco de ensaios do LEMT do DEM.

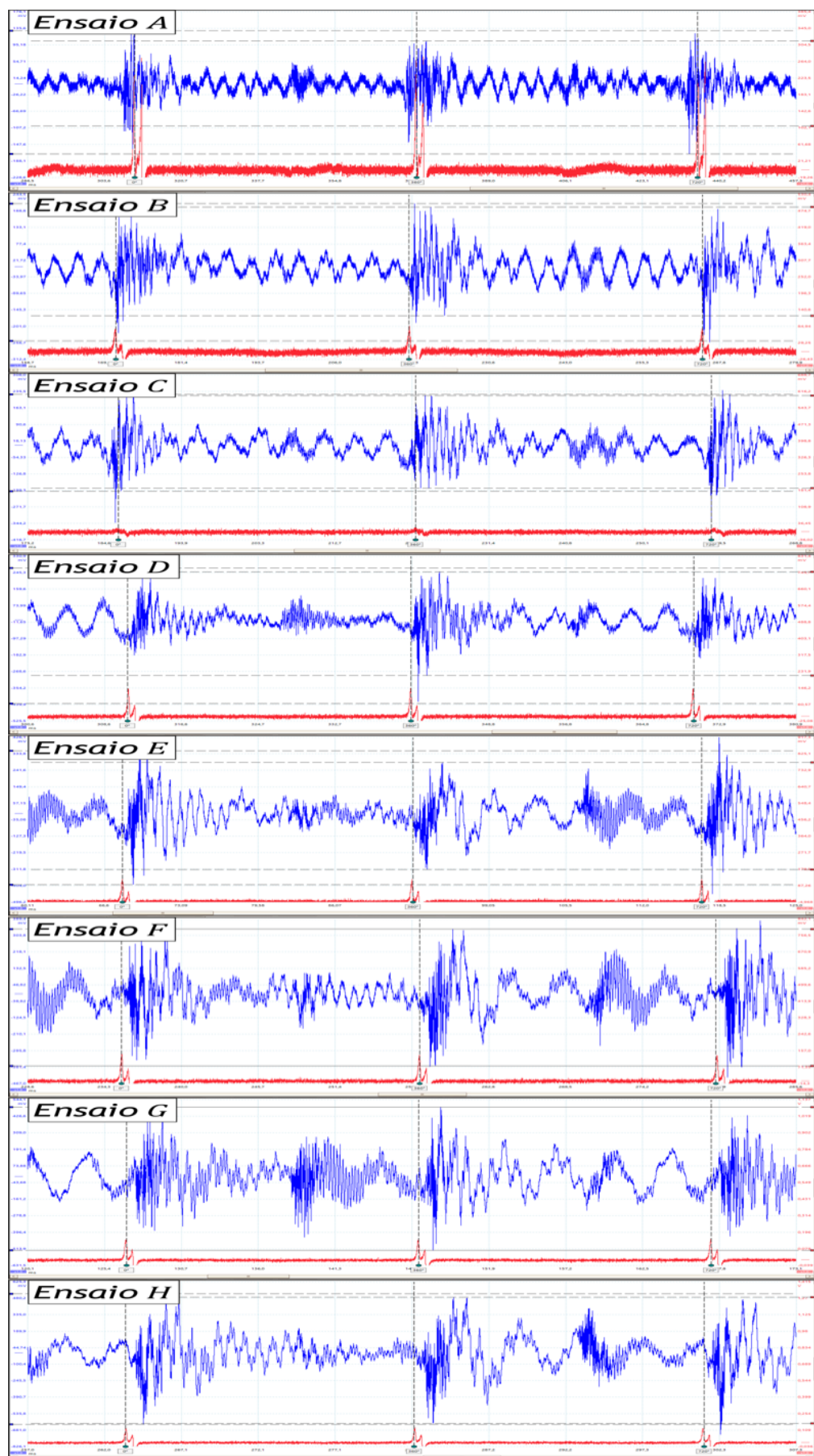


Figura 55 - Ensaios no motor LOMBARDINI.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Na Tabela 5 estão apresentados os valores da rotação por minuto em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, e os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 5 -Ensaio no motor LOMBARDINI.

Ensaio	Rotação [<i>rpm</i>]	Funcionamento do Ciclo [<i>s</i>]	Frequência [<i>Hz</i>]	Amplitude Vibração no Ciclo [<i>V</i>]
Ensaio A	480	0,1251	8,0	0,30
Ensaio B	637	0,0941	10,6	0,46
Ensaio C	827	0,0727	13,8	0,45
Ensaio D	1015	0,0591	16,9	0,71
Ensaio E	1228	0,0489	20,5	0,75
Ensaio F	1361	0,0441	22,7	0,71
Ensaio G	1488	0,0403	24,8	2,30
Ensaio H	1588	0,0378	26,5	1,15

Estes valores relativos aos gráficos dos ensaios apresentados na Figura 55. No motor *LOMBARDINI* foram realizados ensaios as 480/ 487/ 568/ 599/ 637/ 679/ 760/ 793/ 827/ 980/ 1015/ 1228/ 1347/ 1361/ 1434/ 1488/ 1564/ 1588 *rpm*. Para cada um destes ensaios foram realizadas oito medições diferentes, após estas medições foram obtidos os valores médios dessas medições para que fosse possível obter um valor médio para a rotação e para frequência num determinado ensaio, sabendo estes valores médios foi escolhido o ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio do ensaio (ver Figura 56). Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C2 desta dissertação.

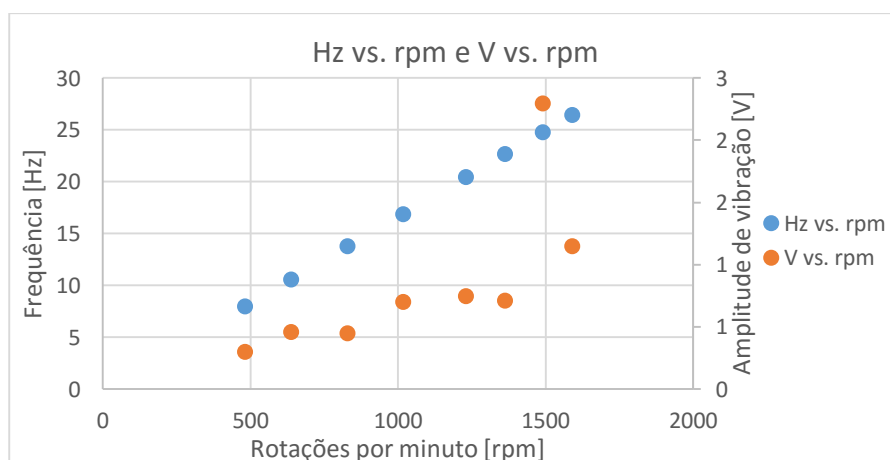


Figura 56 - Gráfico dos ensaios realizados no motor LOMBARDINI.

Na figura 56 estão representados os ensaios relativos à velocidade de rotação mais baixa registada no motor e depois desta estão as velocidades de rotação de 200 em 200 *rpm*, tal como é possível observar na Tabela 5.

Com recurso a Tabela 5 e às Figuras 55 e 56 podemos verificar então que à medida que os valores da rotação aumentam existe uma pequena variação nos valores da amplitude de vibração, mas no geral pode-se afirmar que aumentam a medida que os valores de rotação também aumentam. Podemos observar na Figura 56 uma pequena oscilação na amplitude de vibração aquando do funcionamento do motor perto das 1500 *rpm*, onde é obtido um valor de amplitude de vibração muito elevado em comparação com os resultados registados anteriormente. Após esta velocidade, o valor da amplitude de vibração torna a baixar para valores perto dos registados em outras velocidades. Esta discrepância pode ser atribuída a erros de medição.

4.3 HONDA GX 120

A parte experimental desta dissertação desenvolveu-se essencialmente do banco de ensaios do motor *HONDA GX 120* do DEM. Para os ensaios realizados neste motor, tal como nos noutros motores, era necessário identificar o início e o fim do ciclo de funcionamento do motor. Esta identificação foi obtida através do sinal elétrico do primário da bobine de inflamação. O ângulo de ignição é introduzido no *software* utilizado para o controlo da centralina.

Como sabemos o ângulo em que a faísca é acionada, o ângulo de AI, sabemos então o PMS pois como vimos no início desta dissertação na Figura 9 o ângulo de AI é o ângulo formado pelo disparo da faísca e o PMS do cilindro do motor (ver Figura 57).

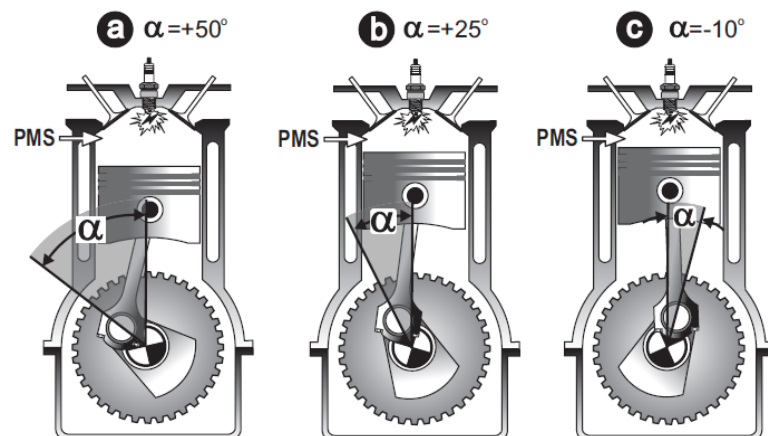
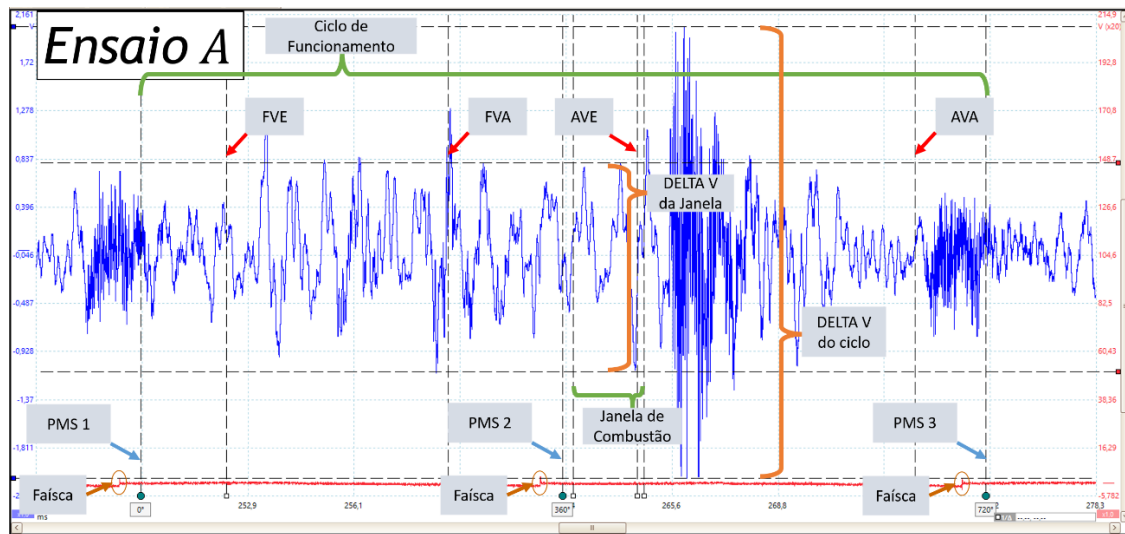


Figura 57 - Posicionamento do pistão em relação ao ângulo de AI [11].

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Da mesma forma que é possível identificar os PMS ao longo de um ciclo de funcionamento deste motor tendo em conta o acionamento da faísca do motor, é possível identificar também o acionamento das válvulas presentes neste motor.



de FVE, FVA, AVE e AVA. Na parte inferior da imagem estão presentes, a cor castanha, as legendas referentes à posição das faíscas ao longo de um ciclo de funcionamento do motor.

Em virtude da existência destas guias, conseguimos então estabelecer uma comparação entre os vários ensaios realizados. Tal como ocorrido na análise dos resultados dos outros dois motores, é possível estabelecer uma comparação com os intervalos de tempo correspondentes a um ciclo de funcionamento do motor, bem como a amplitude de vibração que se regista durante este período, e verificar se existe algum tipo de alteração na vibração do motor aquando da ocorrência do fenómeno de combustão.

Após a recolha de dados obtidos pelo *PicoScope* e feito o devido tratamento da sua informação em folhas de cálculo do *Microsoft Office Excel* foi possível criar os gráficos necessários para observar o comportamento da amplitude da vibração ao longo dos vários ensaios experimentais realizados.

Os ensaios experimentais no motor *HONDA* tiveram dois tipos de considerações na sua análise. Na primeira análise realizada teve-se em consideração um ângulo de AI fixo variando desta forma a velocidade de rotação do motor. A segunda análise teve como considerações fixar uma velocidade de rotação mais ou menos constante e variar os ângulos de AI do motor.

4.3.1 Avanço de Ignição Fixo variando a Velocidade de Rotação

Nesta primeira análise vão ser apresentados os ensaios realizados onde foram fixados os diferentes ângulos de AI e fez-se variar as velocidades de rotação do motor. Inicialmente são apresentadas as imagens dos ensaios, em seguida é exibida uma tabela com os resultados relativos a cada ensaio realizado, e em seguida o gráfico onde estão apresentados os valores de frequência e amplitude de vibração ao longo das velocidades de rotação que foram analisadas em cada um dos ensaios, e por fim são discutido os resultados que foram obtidos.

De seguida são apresentadas algumas Figuras que mostram a sequência de alguns ensaios laboratoriais que foram realizados no banco de ensaios do LEMT do DEM.

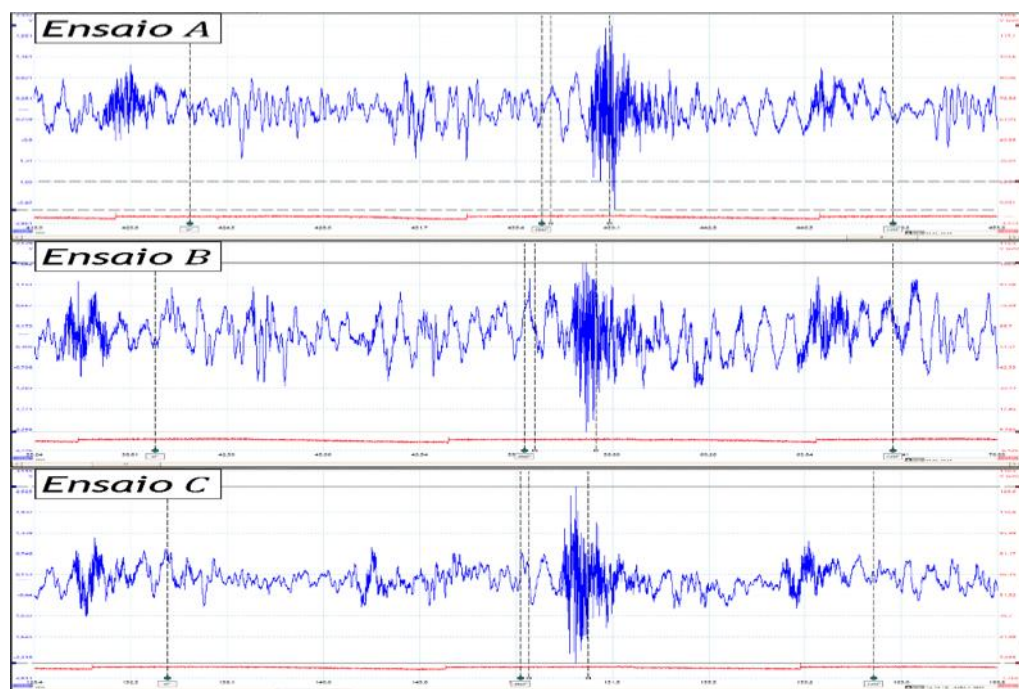


Figura 59 - Ensaios no motor HONDA com AI de 75°.

Na Figura 59 estão apresentados alguns dos ensaios realizados no motor *HONDA* com um ângulo de AI de 75°. Na Tabela 6 são apresentados os valores das velocidades de rotação do motor em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 6 - Ensaios no motor HONDA com AI de 75°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2214	0,0271	36,9	4,78	0,002	4,04
Ensaio B	2192	0,0274	36,5	4,04	0,002	4,04
Ensaio C	2128	0,0282	35,5	5,07	0,002	5,07

No motor *HONDA* com o ângulo de 75° de AI foram ainda obtidos resultados para os ensaios as 2214/ 2212/ 2192/ 2190/ 2174/ 2166/ 2151/ 2128 rpm. Para cada um destes ensaios foram realizadas doze medições diferentes, após estas medições foram obtidos os seus valores médios, de forma a ser possível obter um valor médio para a rotação e outro para a frequência referente

a um determinado ensaio. Sabendo os valores médios de cada ensaio, escolheu-se o ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio do ensaio. Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C3 desta dissertação.

Na figura 60 estão apresentados os ensaios relativos à velocidade de rotação mais baixa registada no motor e depois desta estão as velocidades de 100 em 100 *rpm*, tal como é possível observar na Tabela 6.

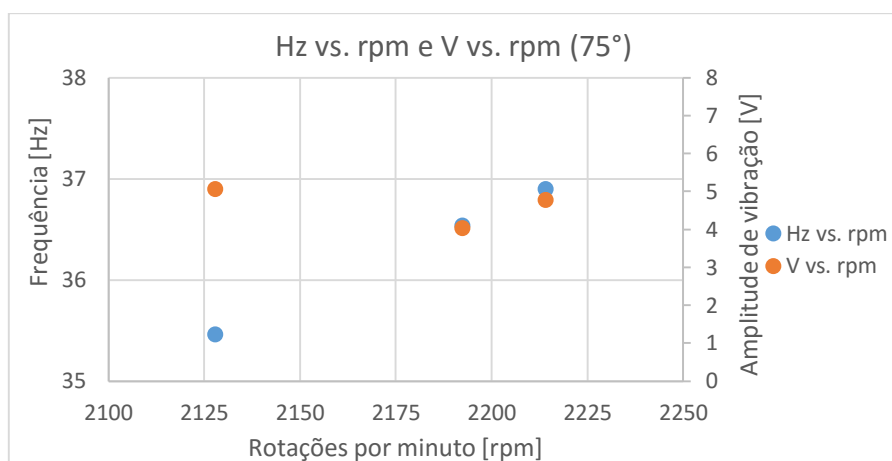


Figura 60 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 75°.

Da Figura 60 podemos observar que com um ângulo de AI de 75°, após começarmos a descer os valores da velocidade de rotação do motor, o motor não consegue funcionar a valores inferiores a 2125 *rpm*, dado que o motor acaba por se desligar. É possível também observar que mesmo antes de este motor se desligar a amplitude de vibração aumenta em relação aos resultados registados anteriormente, isto pode dever-se à grande intensidade com que a detonação é assinalada, fazendo com que o motor se acaba por desligar.

A Figura 61 apresenta os ensaios realizados no motor HONDA com um ângulo de AI de 70° para diferentes valores de velocidade de rotação do motor.

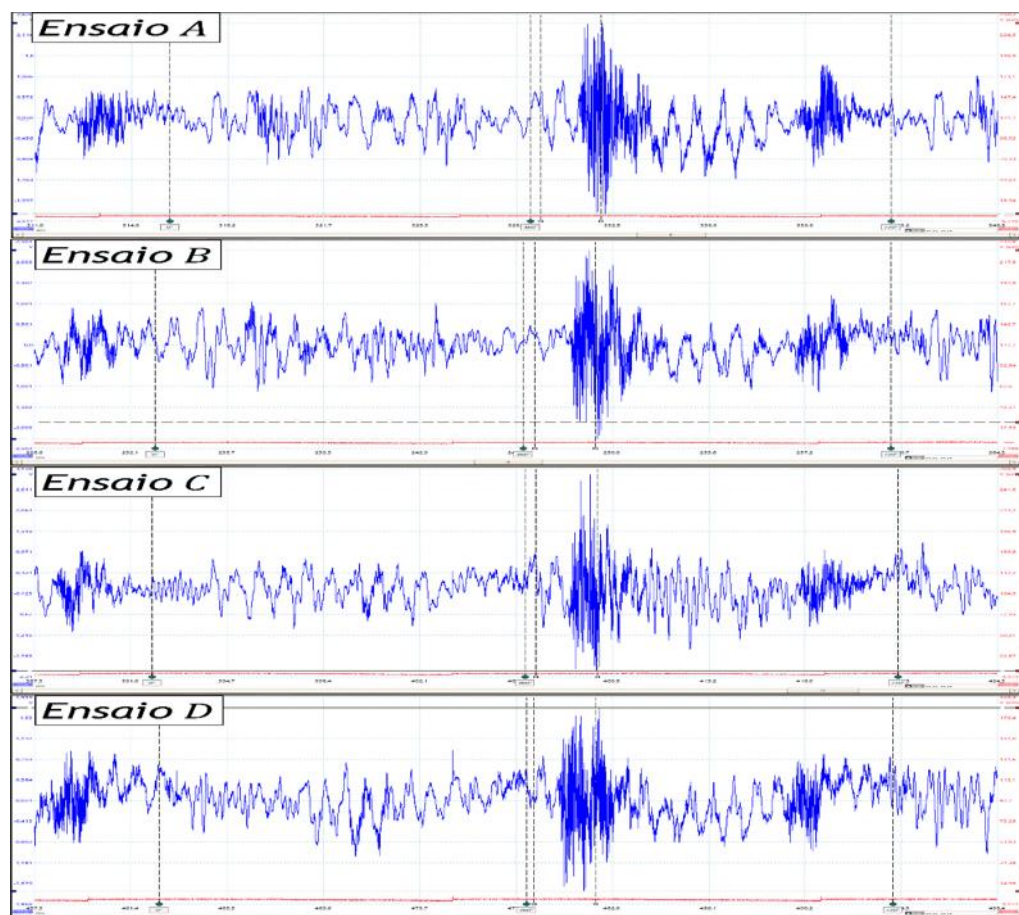


Figura 61 - Ensaios no motor HONDA com AI de 70°.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores relativos aos ensaios apresentados na Figura 61, na qual são apresentados os valores das velocidades de rotação relativas a cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente a esse período de tempo, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 7 - Ensaios no motor HONDA com AI de 70°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2239	0,0268	37,3	4,75	0,0022	4,75
Ensaio B	2198	0,0273	36,6	4,58	0,0022	4,18
Ensaio C	2091	0,0287	34,8	5,16	0,0024	5,16
Ensaio D	1917	0,0313	32,0	3,45	0,0026	3,318

No motor *HONDA GX 120* com o ângulo de 70° de AI foram ainda obtidos resultados para os ensaios as 2239/ 2206/ 2198/ 2167/ 2105/ 2091/ 2042/ 1917 *rpm*.

Para cada um destes ensaios foram realizadas doze medições diferentes. Após estas medições foram obtidos os valores médios dessas medições para que fosse possível obter um valor médio para rotação e para frequência num determinado ensaio (ver Figura 62). Sabendo estes valores médios foi escolhido o ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio do ensaio. O restante dos resultados dos ensaios com um AI de 70° estão apresentados no Anexo C3 desta dissertação.

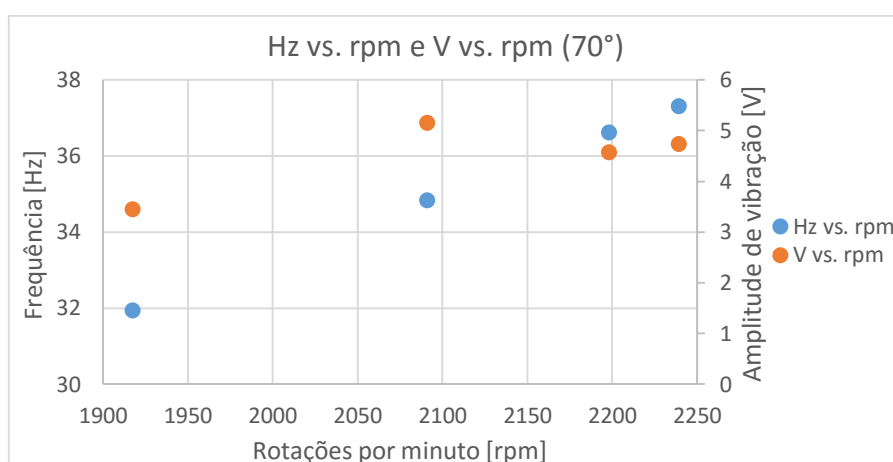


Figura 62 - Gráfico dos ensaios no motor *HONDA* com AI de 70° .

Com recurso às Figura 61 e 62 e recorrendo aos valores da Tabela 7 podemos observar, que tal como ocorrido no ensaio como um ângulo de AI de 75° não existem resultados até ao ralenti do motor, acabando o motor por se desligar perto das 1900 *rpm*. Este facto pode dever-se ao AI ser tão elevado que faz com que o motor deixe de funcionar normalmente. Mesmo antes de este se desligar é registado um valor de maior amplitude de vibração em comparação com os restantes ensaios, tal como aconteceu no ensaio com um AI de 75° .

A Figura 63 apresenta os ensaios realizados no motor *HONDA* com um ângulo de AI de 60° para diferentes valores de velocidade de rotação do motor.

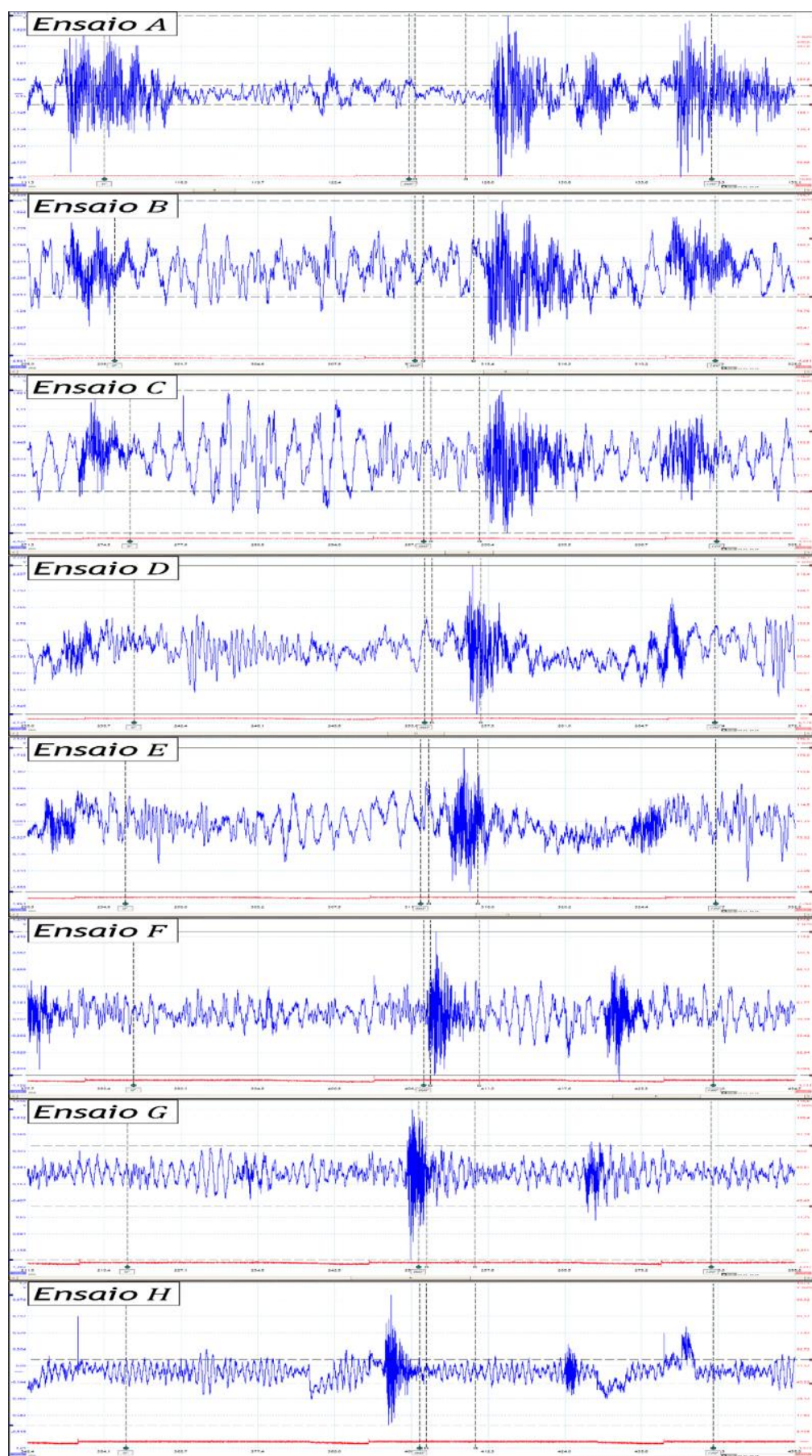


Figura 63 - Ensaio no motor HONDA com AI de 60°.

Na Tabela 8 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 8 - Ensaios no motor HONDA com AI de 60°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2727	0,0220	45,5	9,71	0,0018	1,16
Ensaio B	2632	0,0228	43,9	4,94	0,0019	1,87
Ensaio C	2469	0,0243	41,2	4,16	0,0020	1,73
Ensaio D	2135	0,0281	35,6	4,39	0,0024	4,39
Ensaio E	1840	0,0326	30,7	3,56	0,0027	3,56
Ensaio F	1395	0,0430	23,3	2,29	0,0036	2,29
Ensaio G	1029	0,0583	17,2	2,22	0,0049	0,90
Ensaio H	673	0,0892	11,2	1,76	0,0075	0,32

Neste ensaio com o ângulo de AI de 60° foram ainda obtidos resultados referentes os ensaios as 2765 / 2691 / 2521 / 2381 / 2174 / 2055 / 1807 / 1734 / 1075 / 1007 / 932 / 697 / 673 rpm.

Foram realizadas doze medições diferentes para cada ensaio, depois destas medições foram obtidos os valores médios referentes a essas medições de modo a obter um valor médio para rotação e para frequência de cada ensaio, após o cálculo destes valores médios foi escolhido o ciclo de funcionamento que se aproximava mais do valor médio do ensaio (ver Figura 64). Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C3 desta dissertação.

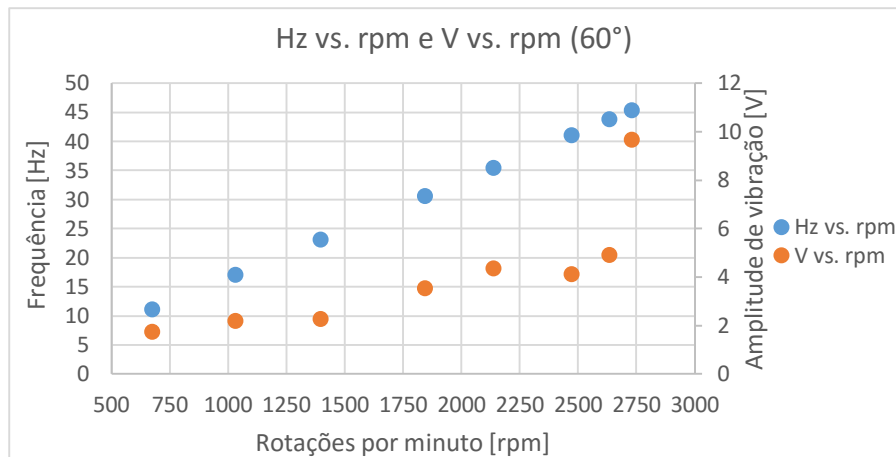


Figura 64 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 60°.

Na figura 64 estão representados sobre a forma gráfica os valores da frequência e da amplitude de vibração relativos aos ensaios da Figura 63. Os ensaios apresentados que vão da velocidade de rotação mais elevada registada pelo motor descendo depois de 400 em 400 *rpm* até o motor atingir o seu ralenti. Com a observação da Figura 63, da Figura 64 e com os dados da Tabela 8 é possível verificar que existe um deslocamento da vibração causada pela combustão da direita para a esquerda da Figura 63. Podemos concluir também que à medida que o valor da velocidade vai diminuindo o valor da amplitude de vibração vão diminuindo também, tornando também a forma da sua onda mais uniforme sem registar grandes oscilações na sua amplitude de vibração.

Na Figura 65 estão apresentados os ensaios realizados no motor HONDA com um ângulo de AI de 50° para diferentes valores de velocidades de rotações do motor.

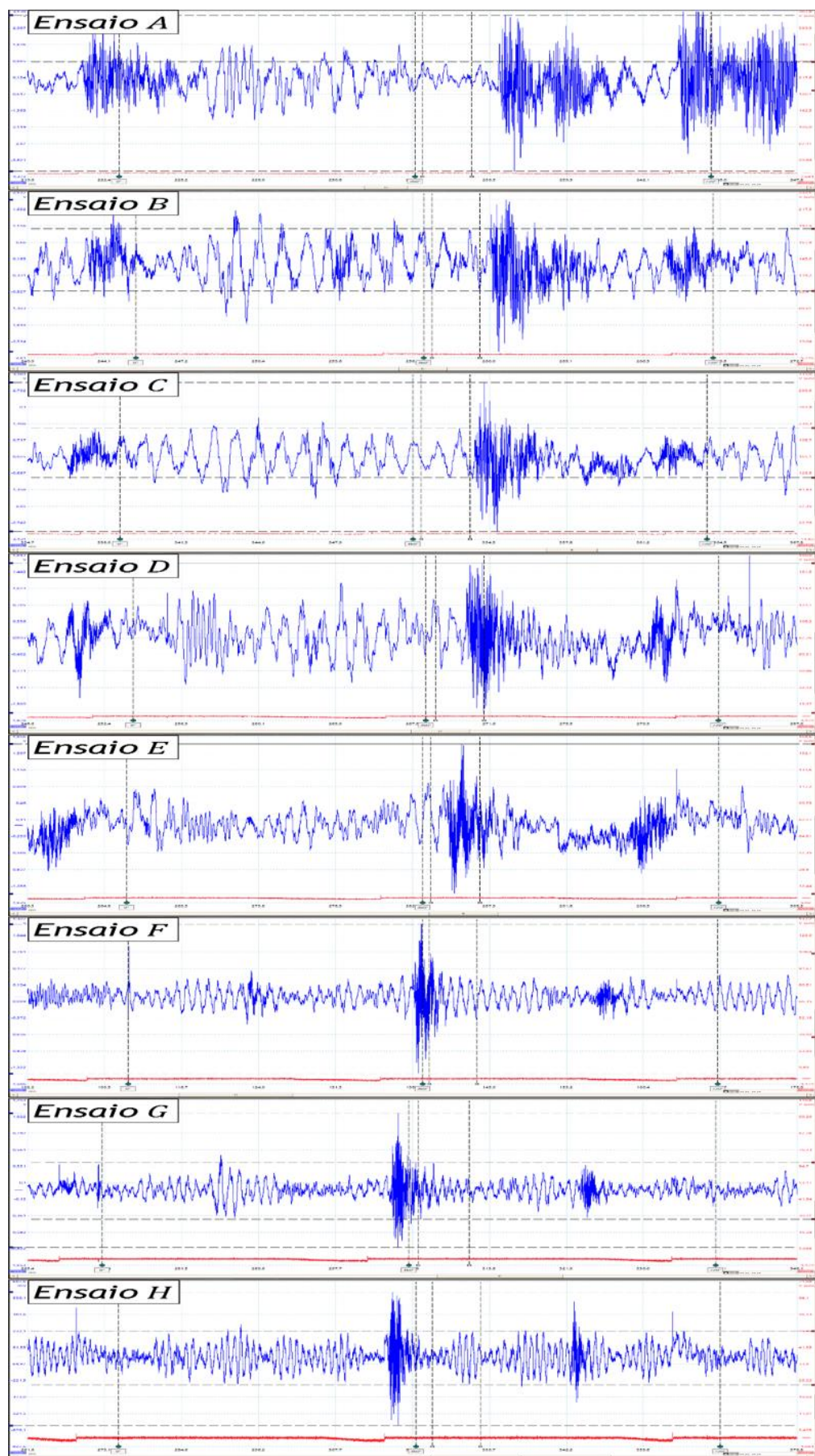


Figura 65 - Ensaios no motor HONDA com AI de 50°.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Na Tabela 9 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 9 - Ensaios no motor HONDA com AI de 50°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2765	0,0217	46,1	7,09	0,0018	1,29
Ensaio B	2521	0,0238	42,1	4,545	0,0019	1,91
Ensaio C	2381	0,0252	39,7	6,21	0,0021	2,07
Ensaio D	2055	0,0292	34,3	3,36	0,0024	3,36
Ensaio E	1734	0,0346	28,9	3,16	0,0029	3,16
Ensaio F	1076	0,0558	17,9	2,57	0,0047	1,36
Ensaio G	932	0,0644	15,5	1,87	0,0053	0,81
Ensaio H	673	0,0891	11,2	1,22	0,0072	0,51

Com este ângulo de AI foram obtidos ainda resultados referentes a ensaios as 2727/ 2632/ 2567/ 2521/ 2469/ 2392/ 2214/ 2198/ 2174/ 2135/ 1840/ 1395/ 1290/ 1029/ 821/ 673 rpm. Tal como com os ensaios anteriores procedeu-se então a análise de doze medições diferentes, após as medições estarem concluídas foram obtidos os valores médios de cada ensaio de maneira a ser possível obter um valor médio dos valores da rotação e de frequência para cada um dos ensaios (ver Figura 66). Descobertos os valores médios quer da rotação quer da frequência foi escolhido o ciclo de funcionamento que se aproximava mais do valor médio de cada ensaio. Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios com um AI de 50° é aconselhável consultar o Anexo C3 desta dissertação.

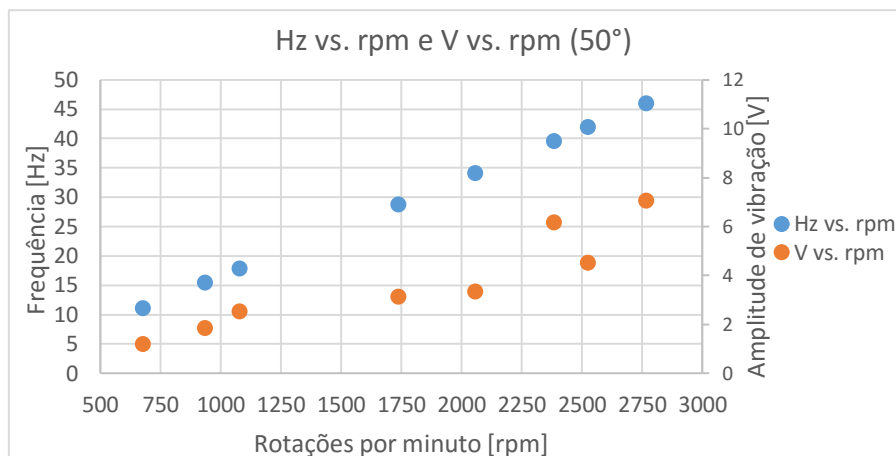


Figura 66 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 50°.

Os ensaios relativos ao AI de 50° começaram a ser registados com a velocidade de rotação mais elevada do motor e depois desta os ensaios foram descendo de 400 em 400 *rpm* até o motor atingir o ralenti. Tal como é possível observar na Figura 65 e na Tabela 9. Tendo por base a Figura 66 podemos concluir, que não é possível registar e retirar qualquer resultado do funcionamento do motor no intervalo que é compreendido entre as 1200 e as 1650 *rpm*. Esta falta de informação pode dever-se a erros da captura do sinal, pois os resultados eram retirados alterando a posição do acelerador do motor levando assim a possíveis erros na obtenção de algumas *rpm*. Tendo em consideração as informações que acima são apresentadas podemos afirmar que tal como nos ensaios realizados com um AI de 60° o fenómeno da combustão tem tendência a aproximar-se do lado esquerdo da Figura 65, podemos também afirmar que nos últimos ensaios registados (Ensaio F/ Ensaio G/Ensaio H) o sinal de vibração captado do motor tem uma forma muito clara sem oscilações muito constantes o que leva a crer que os grandes picos sentidos nesse ciclo de funcionamento sejam causados por combustões anormais como por exemplo a pré-ignição e a detonação.

Na Figura 67 estão apresentados os ensaios realizados no motor HONDA com um ângulo de AI de 40° para diferentes valores de velocidades de rotação.

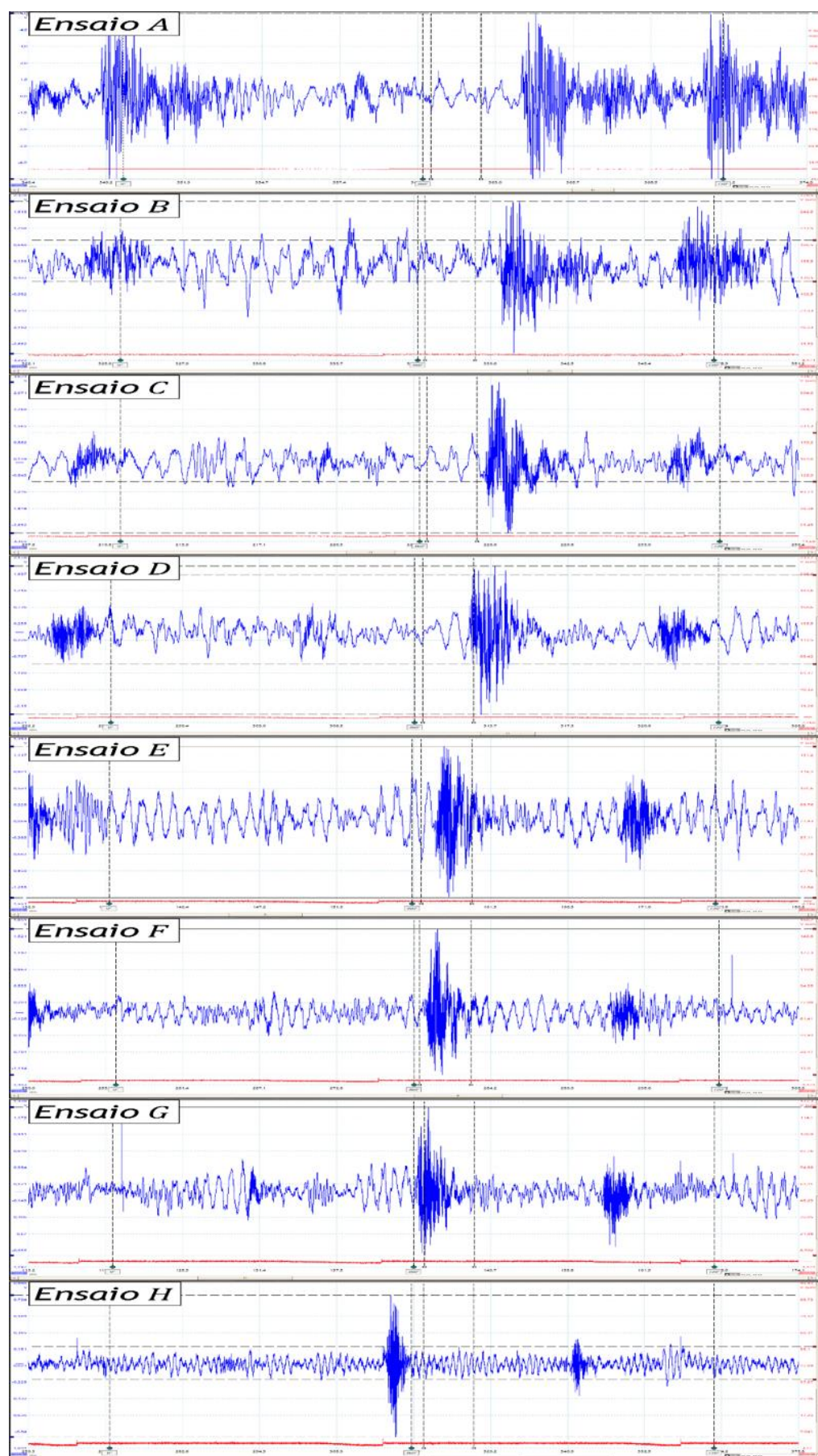


Figura 67 - Ensaios no motor HONDA com AI de 40°.

Na Tabela 10 estão apresentados os valores da velocidade rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 10 - Ensaios no motor HONDA com AI de 40°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2830	0,0212	47,3	10,00	0,0017	2,47
Ensaio B	2667	0,0225	44,4	5,17	0,0019	1,40
Ensaio C	2429	0,0247	40,5	6,43	0,0021	2,08
Ensaio D	2128	0,0282	35,5	4,33	0,0024	2,58
Ensaio E	1600	0,0375	26,7	2,72	0,0031	2,72
Ensaio F	1361	0,0441	22,7	2,86	0,0037	2,86
Ensaio G	1261	0,0476	21,0	2,36	0,0040	2,36
Ensaio H	656	0,0914	10,9	1,75	0,0075	0,40

A Tabela 10 apresenta os valores relativos aos ensaios apresentados na Figura 67. No motor *HONDA* com o ângulo de 40° de AI foram obtidos resultados para os ensaios as 2830/ 2715/ 2667/ 2532/ 2429/ 2206/ 2128/ 1600/ 1504/ 1361/ 1261/ 656 rpm. Para cada um destes ensaios foram realizadas doze medições diferentes, após estas medições foram obtidos os valores médios dessas medições para que fosse possível obter um valor médio para rotação e para frequência num determinado ensaio, sabendo estes valores médios foi escolhido o ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio do ensaio (ver Figura 68). Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C3 desta dissertação.

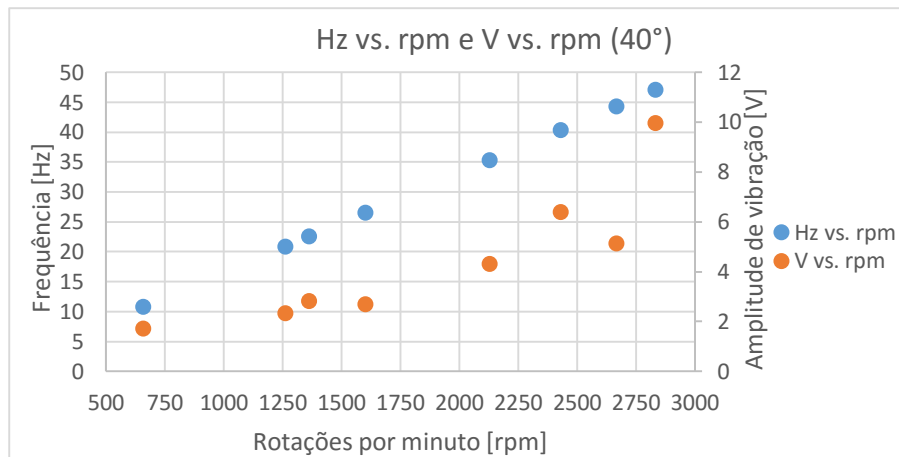


Figura 68 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com AI de 40°.

Na Figura 68 estão representados os ensaios relativos à velocidade de rotação mais elevada registada pelo motor e depois desta vai descendo de 400 *rpm* até atingir o ralenti, tal como é possível observar na Tabela 10.

Analisando o conjunto das Figuras 67 e 68 e recorrendo aos dados apresentados na Tabela 10 podemos verificar que tal como ensaios anteriores, há dificuldade em obter certos valores de rotação, entre as 750 e 1250 *rpm* e entre as 1700 e as 2100 *rpm*. Podemos verificar pela Figura 67 que os últimos três ensaios a sua forma de onda tem um comportamento semelhante, sem grandes variações nos valores de amplitude de vibração.

Na Figura 69 estão apresentados os ensaios realizados no motor HONDA com um ângulo de AI de 30° variando os valores da velocidade de rotação.

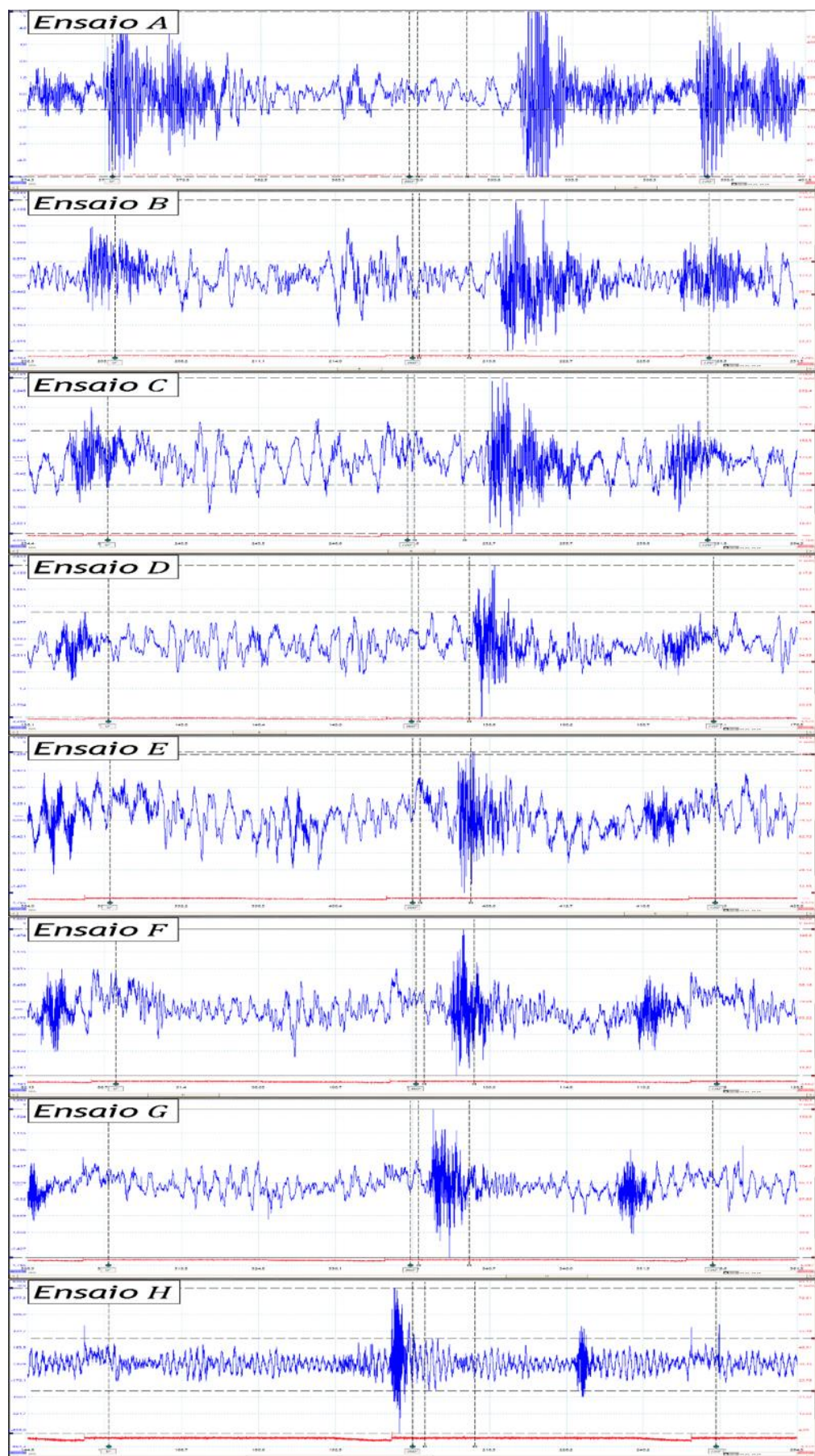


Figura 69 - Ensaios no motor HONDA com AI de 30°.

Detecção de Detonação em Motores de Pistão

Na Tabela 11 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 11 - Ensaios no motor HONDA com AI de 30°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2857	0,021	47,6	10,00	0,0018	1,99
Ensaio B	2667	0,0225	44,4	4,67	0,0019	1,02
Ensaio C	2532	0,0237	42,2	5,02	0,002	1,73
Ensaio D	2214	0,0271	36,9	4,54	0,0023	1,48
Ensaio E	1858	0,0323	31,0	2,87	0,0027	2,81
Ensaio F	1660	0,0362	27,7	2,93	0,0030	2,93
Ensaio G	1442	0,0416	24,0	3,32	0,0035	3,32
Ensaio H	638	0,094	10,6	1,51	0,0077	0,55

A Tabela 11 estão apresentados os valores relativos aos gráficos dos ensaios apresentados na figura 69. No motor *HONDA* com o ângulo de 30° de AI foram obtidos resultados para os ensaios as 2857/ 2667/ 2532/ 2214/ 2174/ 1858/ 1660/ 1442/ 711/ 638 rpm. Para cada um destes ensaios foram realizadas doze medições diferentes, após estas medições foram obtidos os valores médios dessas medições para que fosse possível obter um valor médio para rotação e para frequência num determinado ensaio, sabendo estes valores médios foi escolhido o ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio do ensaio (ver Figura 70). Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C3 desta dissertação.

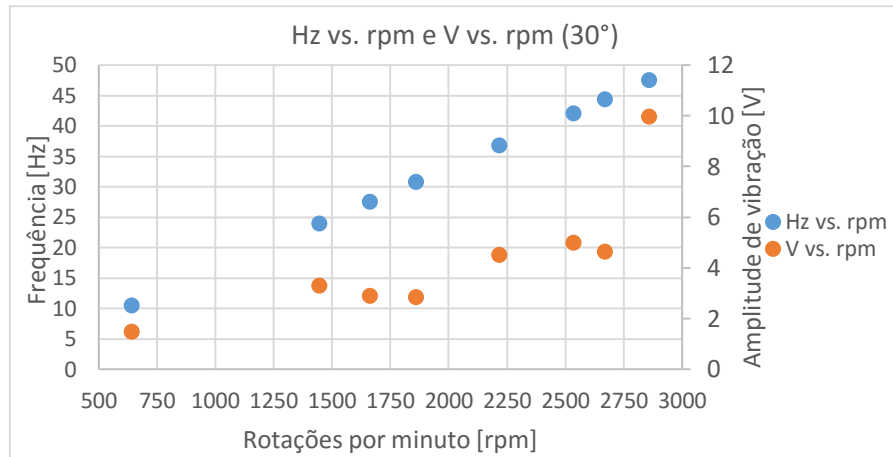


Figura 70 - Gráficos dos ensaios no motor HONDA com AI de 30°.

Tendo em consideração as Figuras 69 e 70 e recorrendo os dados que são apresentados na Tabela 11 podemos afirmar que já existe uma pequena oscilação no que toca aos valores da amplitude de vibração com um AI de 30°, exceção feita ao Ensaio A onde o valor da amplitude de vibração é muito superior a todos os restantes. Tal como esperado existe dificuldade em encontrar valores para as rotações mais baixas do motor, neste caso a dificuldade esteve em encontrar valores entre as 750 rpm e as 1300 rpm.

Na Figura 71 apresentam-se os ensaios realizados no motor HONDA com um ângulo de AI de 20° para diferentes valores de velocidades de rotação.

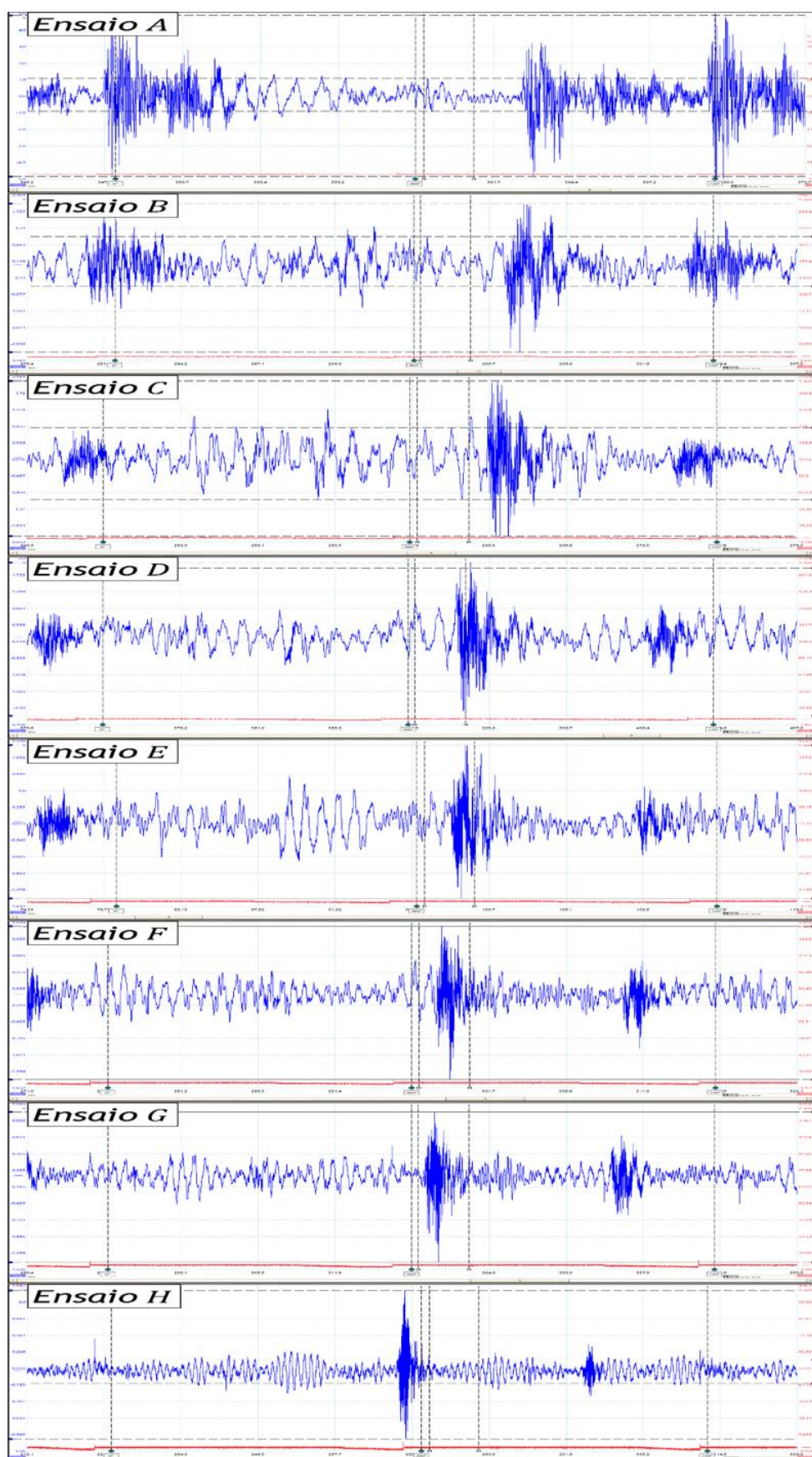


Figura 71 - Ensaios no motor HONDA com 20° de AI.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 12 - Ensaios no motor HONDA com 20° de AI.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2830	0,0212	47,2	9,66	0,0018	2,00
Ensaio B	2679	0,0224	44,6	4,91	0,0019	1,65
Ensaio C	2372	0,0253	39,5	4,15	0,0021	1,97
Ensaio D	2041	0,0294	34,0	4,30	0,0025	4,15
Ensaio E	1749	0,0343	29,2	2,94	0,0029	2,94
Ensaio F	1485	0,0404	24,8	2,69	0,0034	2,69
Ensaio G	1198	0,0501	20,0	2,46	0,0042	2,46
Ensaio H	670	0,0895	11,2	1,97	0,0073	0,31

A Tabela 12 apresenta os valores relativos aos ensaios realizados no motor *HONDA* com o ângulo de 20° de AI. Tem em conta todos os ensaios realizados foram obtidos resultados para as 2830/ 2764/ 2679/ 2372/ 2246/ 2041/ 1749/ 1485/ 1198/ 1064/ 723/ 670 rpm. Para cada um destes ensaios foram realizadas doze medições diferentes, após estas medições foram obtidos os valores médios dessas medições para que fosse possível obter um valor médio para rotação e para frequência num determinado ensaio, sabendo estes valores médios foi escolhido o ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio do ensaio (ver Figura 72). Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C3 desta dissertação.

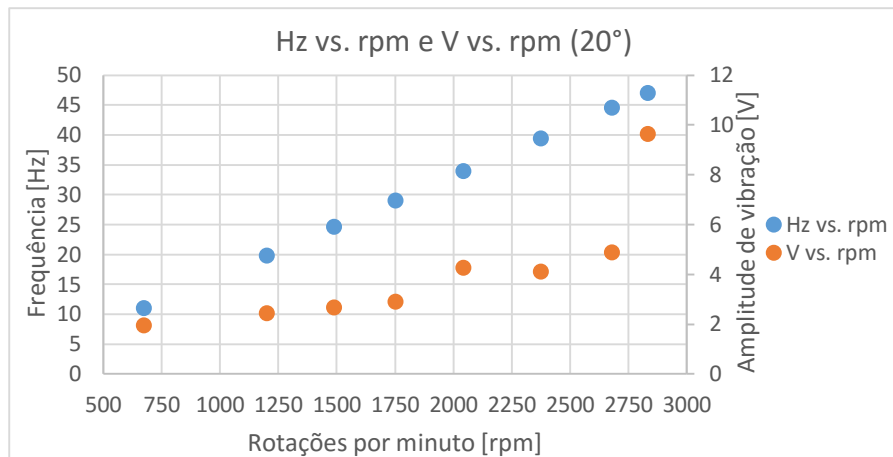


Figura 72 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com 20° de AI.

Os ensaios foram realizados começando o motor a funcionar na velocidade de rotação mais elevada e depois os valores da velocidade foram descendo em cerca de 400 *rpm* até atingir o motor atingindo o seu funcionamento em ralenti.

Observando as Figuras 71 e 72 e recorrendo aos dados apresentados na Tabela 12 podemos afirmar que o deslocamento da combustão é feito da direita para a esquerda, à medida que os valores da velocidade vão baixando. Podemos observar que a posição da vibração relativa a combustão, na velocidade mais baixa, está mais próxima do início da janela de combustão do que nos outros ensaios onde esta está muito mais afastada do início da janela de combustão.

Podemos concluir também que não se verifica uma grande oscilação nos valores de amplitude de vibração, tirando o Ensaio A que é o ensaio onde o motor atinge o valor de velocidade mais elevado e consequentemente o maior valor de amplitude de vibração.

Na Figura 73 estão apresentados os ensaios realizados no motor HONDA com um ângulo de AI de 10° para diferentes valores de velocidades de rotação.

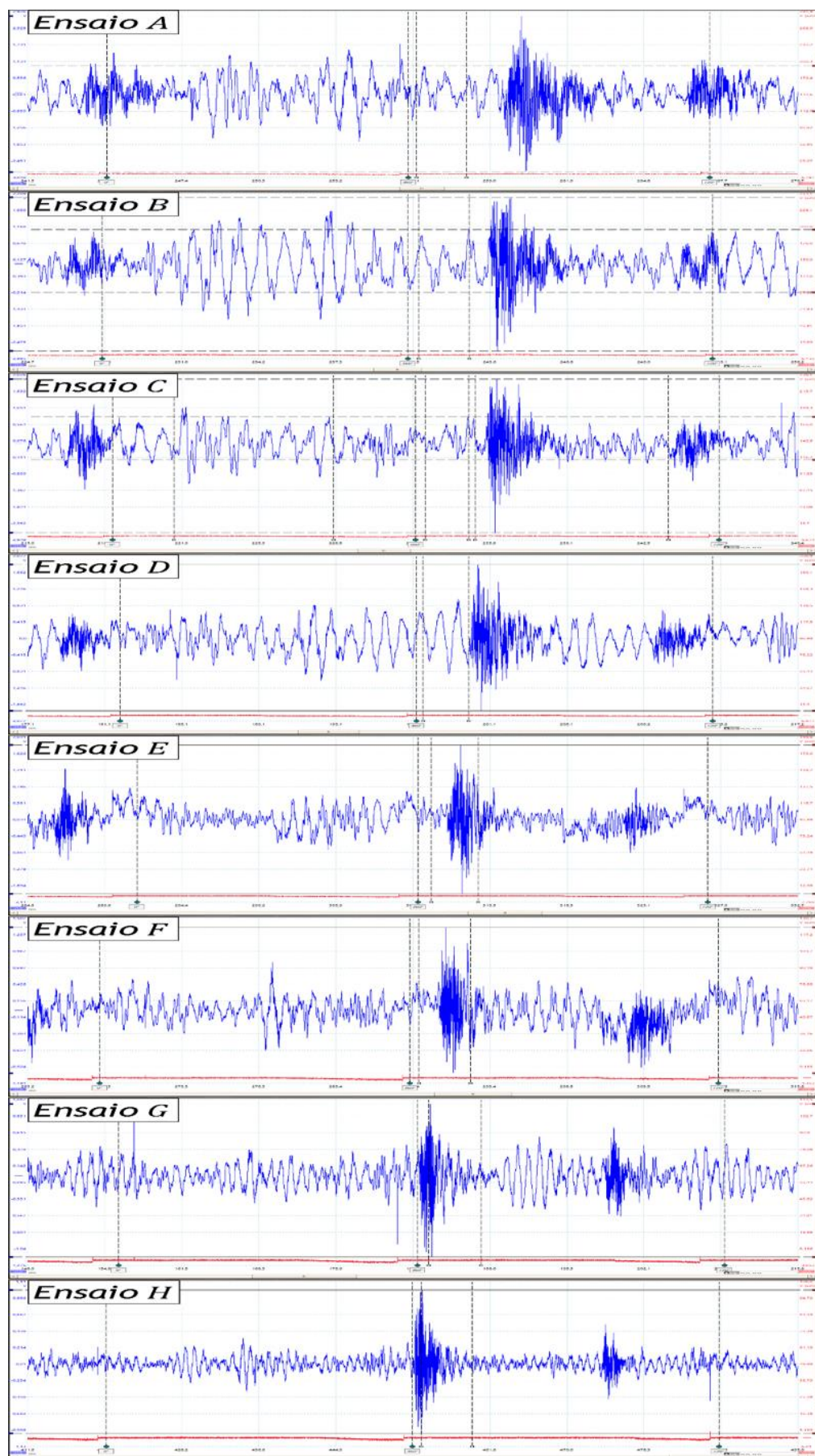


Figura 73 - Ensaio no motor HONDA com 10° de AI.

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

Na Tabela 13 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento.

Tabela 13 - Ensaios no motor HONDA com 10° de AI.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	2632	0,0228	43,9	5,60	0,0019	1,62
Ensaio B	2400	0,025	40,0	4,85	0,0021	1,98
Ensaio C	2214	0,0271	36,9	4,55	0,0023	1,27
Ensaio D	1948	0,0308	32,5	3,69	0,0026	1,90
Ensaio E	1690	0,0355	28,2	3,74	0,0029	3,74
Ensaio F	1485	0,0404	24,8	2,40	0,0034	2,40
Ensaio G	1130	0,0531	18,8	2,17	0,0044	2,17
Ensaio H	904	0,0664	15,1	1,95	0,0055	1,95

Nos ensaios realizados no motor HONDA com o ângulo de 10° de AI foram ainda obtidos resultados para os ensaios as 2632/ 2400/ 2214/ 2174/ 2166/ 2135/ 1948/ 1690/ 1544/ 1485/ 1351/ 1130/ 904 rpm. Para cada um destes ensaios foram realizadas doze medições diferentes, após estas medições foram obtidos os valores médios dessas medições para que fosse possível obter um valor médio para rotação e para frequência num determinado ensaio, sabendo estes valores médios foi escolhido o ciclo de funcionamento que tinha o valor mais aproximado ao valor médio do ensaio (ver Figura 74). Para consultar o resto dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste motor é aconselhável consultar o Anexo C3 desta dissertação.

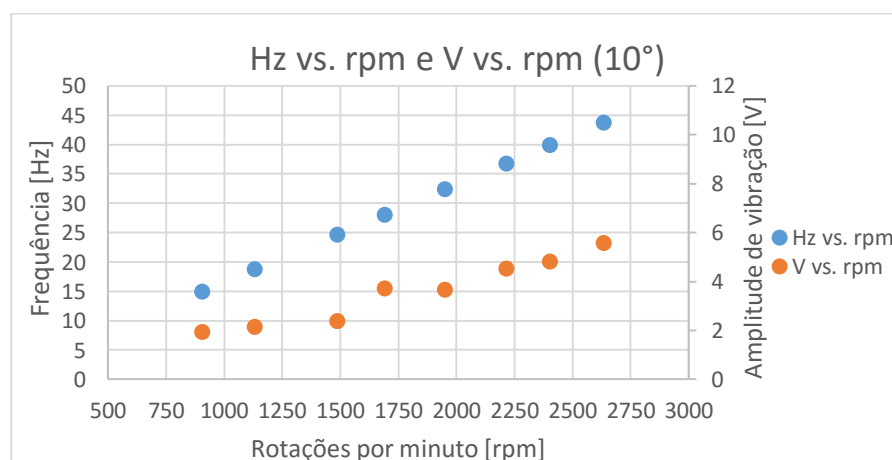


Figura 74 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA com 10° de AI.

Os ensaios foram realizados começando o motor a funcionar na velocidade mais elevada e depois os valores da velocidade foram descendo em cerca de 300 *rpm* até atingir o motor atingir o seu funcionamento em ralenti.

Nos ensaios realizados com um AI de 10° podemos verificar que os valores de amplitude de vibração de cada ensaio têm valores mais aproximados um dos outros e sem grande discrepância, mesmo o valor da amplitude de vibração quando a velocidade atinge valores mais elevados não regista um valor tão elevado como quando o ângulo de AI é maior. Quando o motor atinge o valor de rotação mais baixo podemos verificar que a vibração correspondente a combustão já se encontra dentro da janela de combustão.

4.3.1 Velocidade de Rotação Fixa variando o Avanço de Ignição

Na segunda análise aos dados recolhidos dos ensaios realizados no motor *HONDA* escolheu-se uma velocidade de rotação aproximadamente constante e variou-se os ângulos de AI do motor.

A Figura 75 apresenta os ensaios realizados no motor *HONDA* com uma velocidade de rotação aproximadamente constante de 700 *rpm* variando os valores dos ângulos de AI.

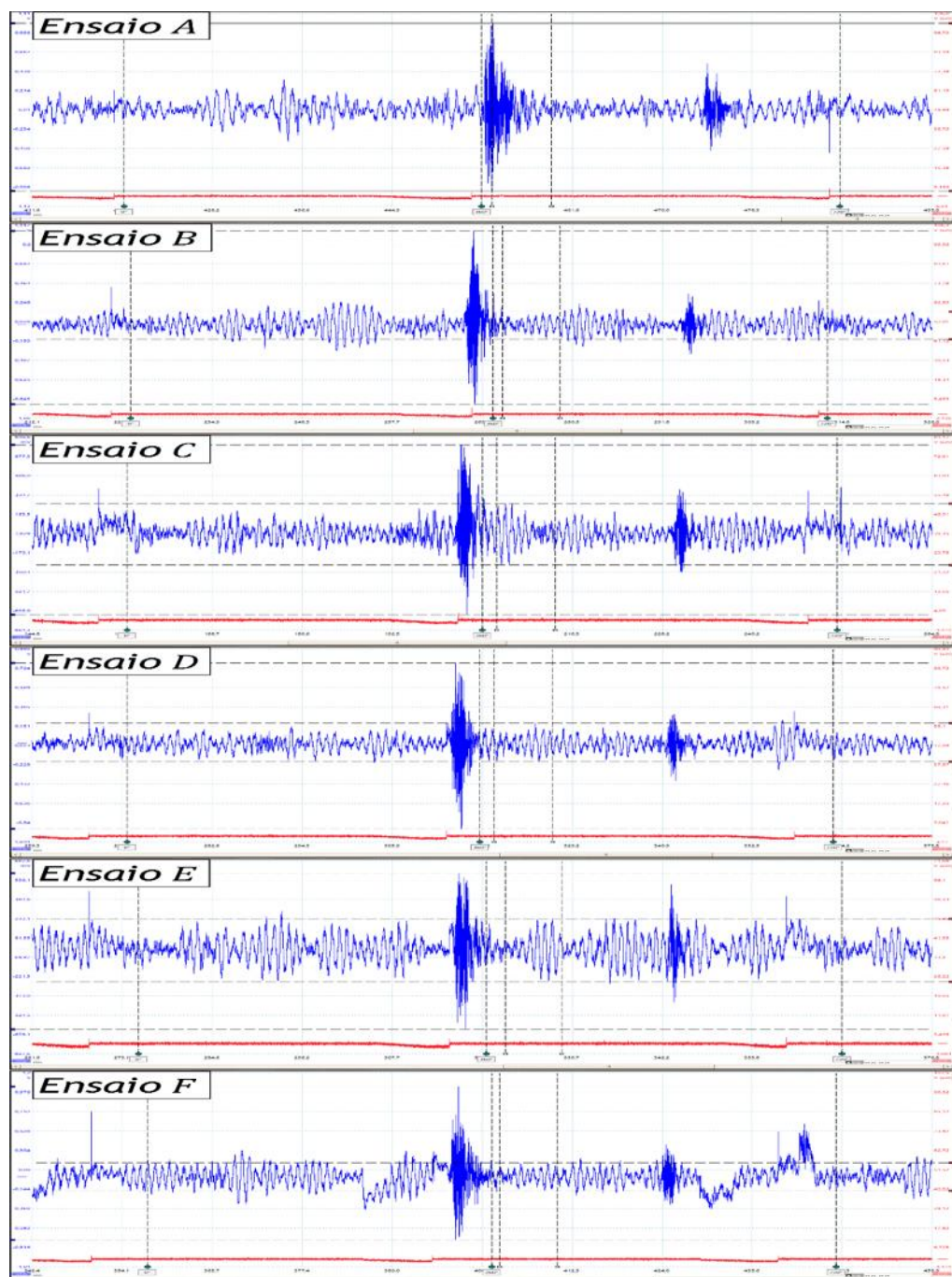


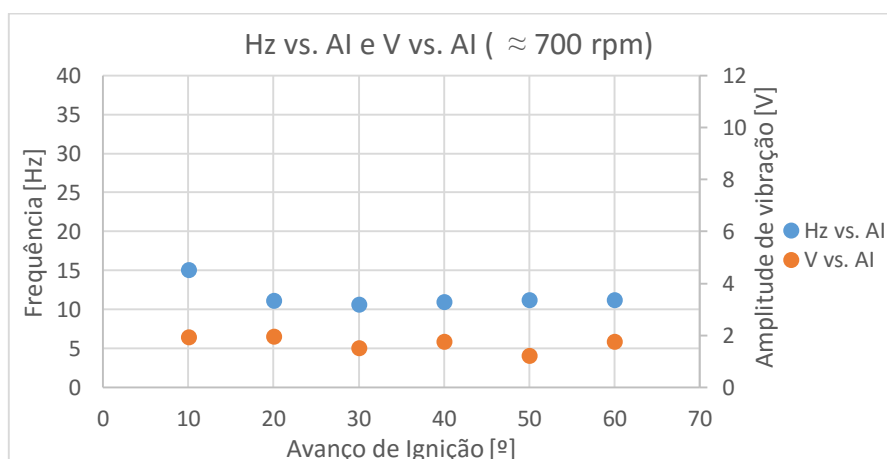
Figura 75 - Ensaio no motor HONDA a ≈ 700 rpm.

Na Tabela 14 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento, bem como o ângulo de AI correspondente a cada ensaio.

Tabela 14 - Ensaios no motor HONDA a ≈ 700 rpm.

Ensaio	Ângulo AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	10	904	0,0664	15,1	1,95	0,0055	1,95
Ensaio B	20	670	0,0895	11,2	1,97	0,0073	0,31
Ensaio C	30	638	0,094	10,6	1,51	0,0077	0,55
Ensaio D	40	656	0,0914	10,9	1,75	0,0075	0,40
Ensaio E	50	673	0,0891	11,2	1,22	0,0072	0,51
Ensaio F	60	673	0,0892	11,2	1,76	0,0075	0,32

Na Figura 76 estão apresentados os valores relativos aos ensaios apresentados na Figura 75.


 Figura 76 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a ≈ 700 rpm.

Tendo em conta a Figura 74 e 75 e a Tabela 14 podemos observar que a vibração correspondente à combustão se aproxima muito da faísca à medida que o ângulo de AI vai avançando, e esta vibração situa-se já fora da janela de combustão. É possível verificar ainda que as amplitudes de vibração relativas aos ciclos de funcionamento e as janelas de combustão têm valores muito aproximados, o formato das ondas captadas pelo sensor de vibração são muito semelhantes, exceção feita ao Ensaio F onde se regista alguma alteração na vibração que é sentida ao longo do seu ciclo de funcionamento.

Na Figura 77 estão apresentados os ensaios realizados no motor *HONDA* com uma velocidade de rotação aproximada de 1400 rpm variando os valores dos ângulos de AI.

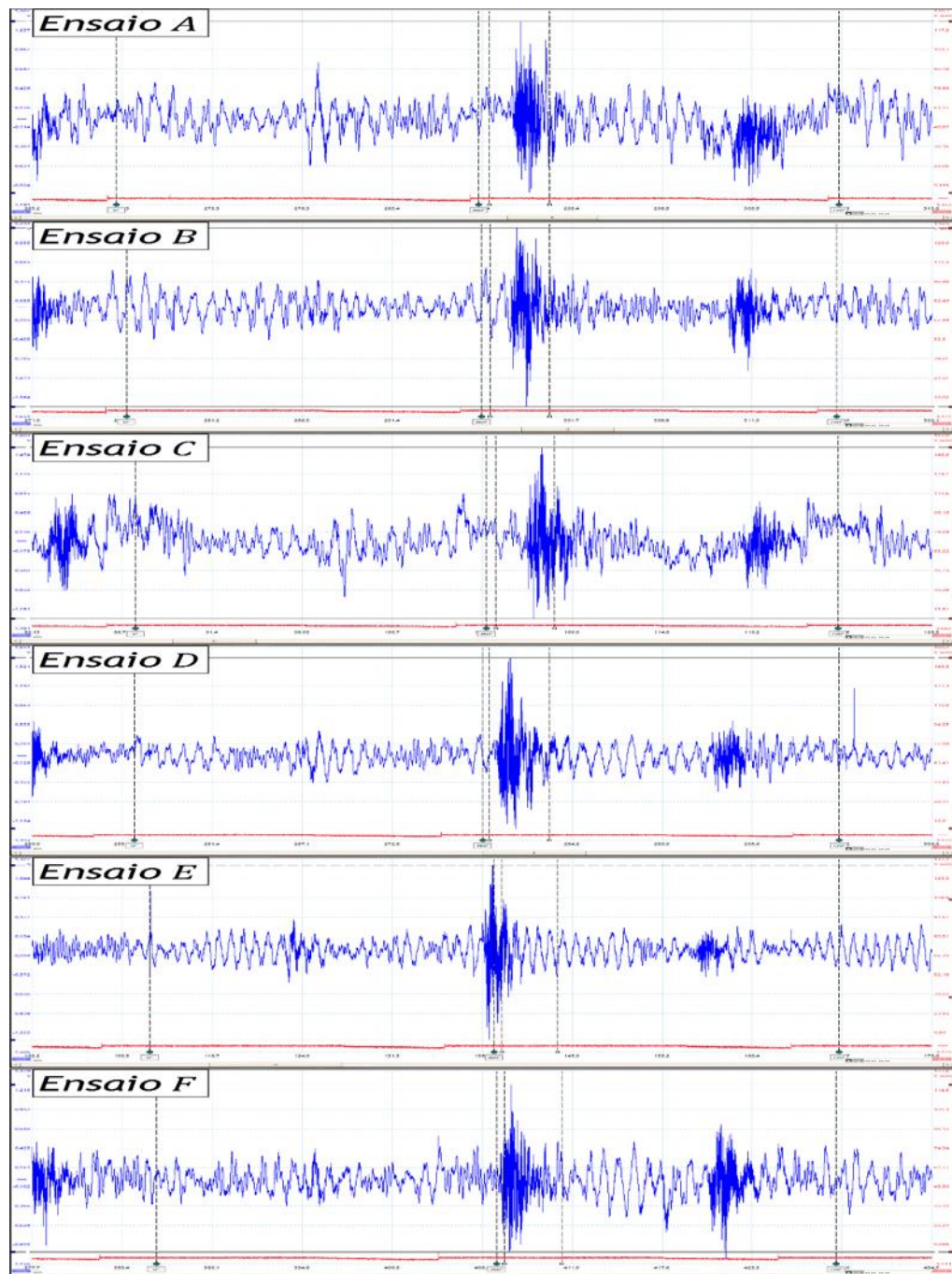


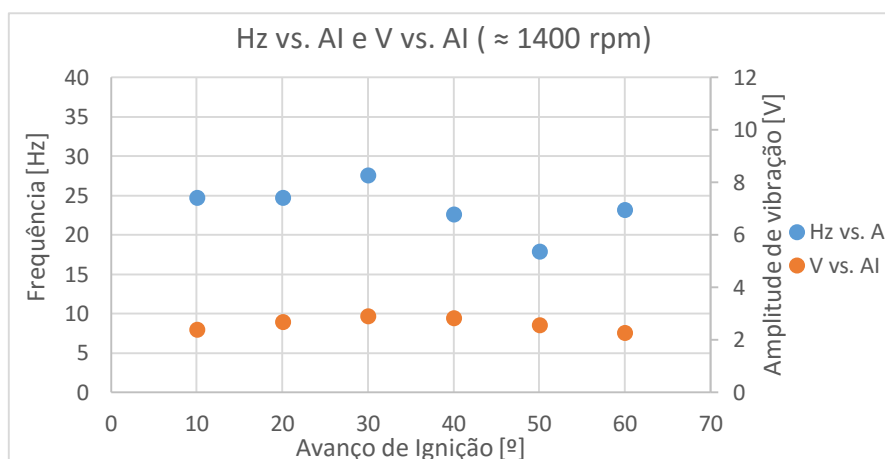
Figura 77 - Ensaios no motor HONDA a ≈ 1400 rpm.

Na Tabela 15 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento, bem como o ângulo de AI correspondente a cada ensaio.

Tabela 15 - Ensaios no motor HONDA a ≈ 1400 rpm.

Ensaio	Ângulo AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	10	1485	0,0404	24,8	2,40	0,0034	2,40
Ensaio B	20	1485	0,0404	24,8	2,69	0,0034	2,69
Ensaio C	30	1660	0,0362	27,7	2,93	0,0031	2,932
Ensaio D	40	1361	0,0441	22,7	2,86	0,0037	2,86
Ensaio E	50	1075	0,0558	17,9	2,57	0,0047	1,38
Ensaio F	60	1395	0,0430	23,3	2,29	0,0036	2,29

Utilizando a informação da Tabela 15 foi possível criar o gráfico (ver Figura 78) relativo aos valores referentes a Figura 77.


 Figura 78 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a ≈ 1400 rpm

Analisando a Figura 77 e 78 e a Tabela 15 podemos concluir que durante estes valores de rpm a vibração referente ao fenómeno de combustão encontra-se dentro da janela de combustão e vai-se aproximando do limite inicial desta janela, isto é, existe um deslocamento da vibração referente a combustão da direita para a esquerda da Figura 77. Nestes ensaios realizados com uma velocidade constante de 1400 rpm verificamos também uma amplitude de vibração com valores similares, sendo que o valor máximo da amplitude de vibração correspondente à altura em que se regista o fenómeno de combustão.

Na Figura 79 estão apresentados os ensaios realizados no motor HONDA com uma velocidade constante de 2300 rpm variando os valores dos ângulos de AI.

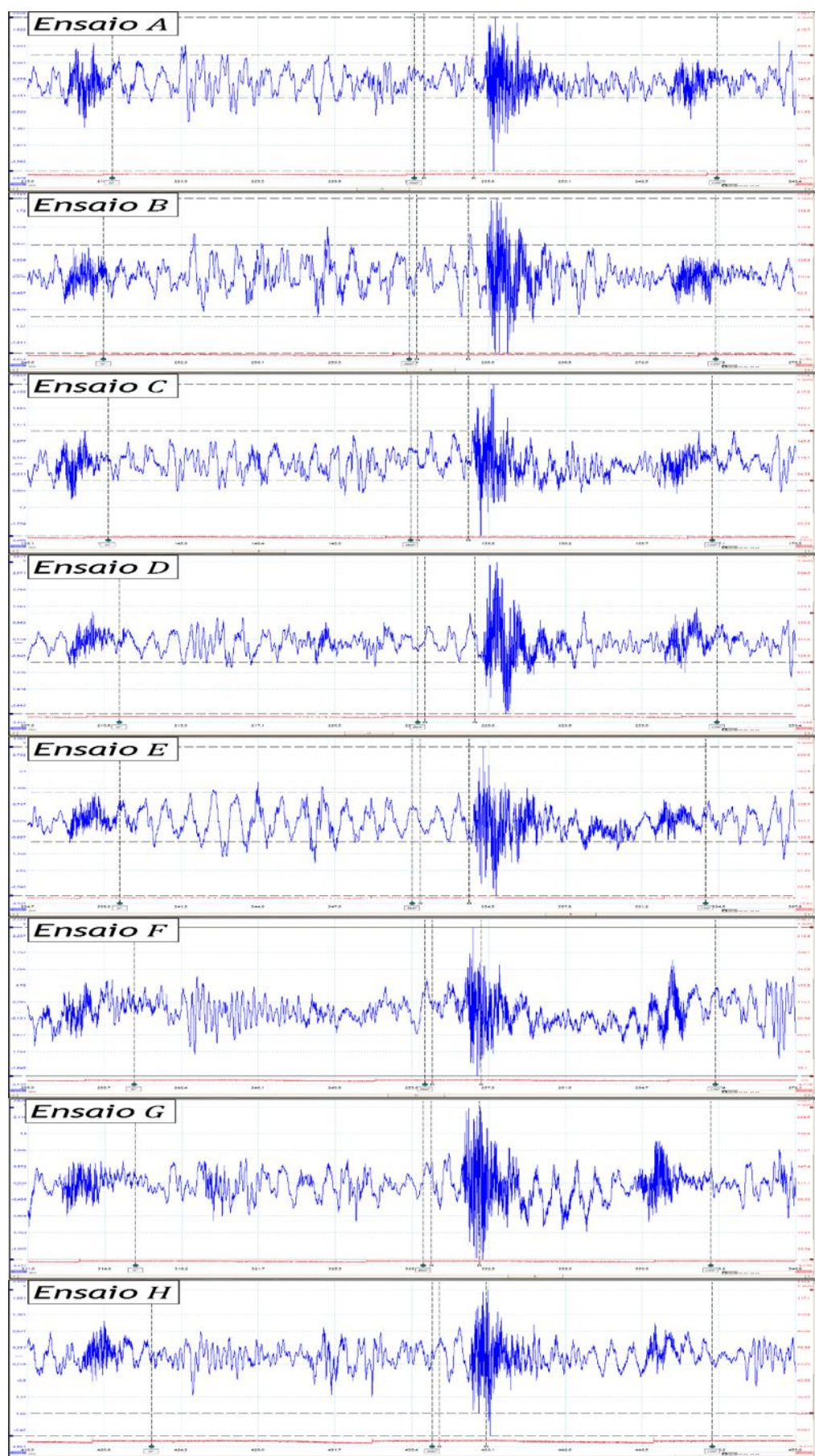


Figura 79 - Ensaio no motor HONDA a ≈ 2300 rpm.

Na Tabela 16 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento, bem como o ângulo de AI correspondente a cada ensaio.

Tabela 16 - Ensaios no motor HONDA a ≈ 2300 rpm.

Ensaio	Ângulo AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	10	2214	0,0271	36,9	4,55	0,0023	1,27
Ensaio B	20	2372	0,0253	39,5	4,15	0,0021	1,97
Ensaio C	30	2214	0,0271	36,9	4,54	0,0023	1,48
Ensaio D	40	2429	0,0247	40,5	6,43	0,0021	2,08
Ensaio E	50	2381	0,0252	39,7	6,21	0,0021	2,07
Ensaio F	60	2135	0,0281	35,6	4,39	0,00235	4,39
Ensaio G	70	2239	0,0268	37,3	4,75	0,0022	4,75
Ensaio H	75	2214	0,0271	36,9	4,78	0,0023	4,04

Na Figura 80 apresentam-se os resultados para o ensaio à velocidade de 2300 rpm.

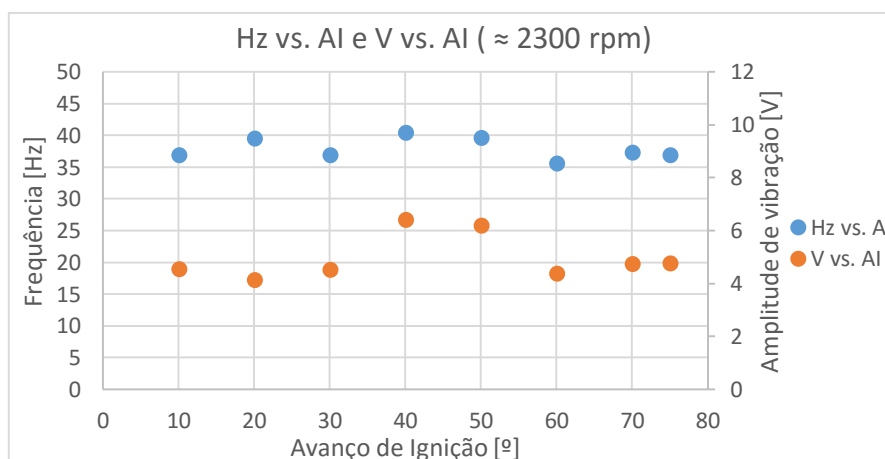


Figura 80 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a ≈ 2300 rpm.

Para analisar esta velocidade de rotação, recorreremos às Figura 79 e 80 e Tabela 16, podendo concluir que a combustão ocorre maioritariamente fora da janela de combustão, aproximando-se desta janela à medida a que os ângulos de AI vão aumentando. A amplitude de vibração de

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

casa ensaio não varia muito, tendo uma pequena variação no Ensaio D e no Ensaio E, pois nestes ensaios são registradas as velocidades mais elevadas em comparação com os restantes ensaios.

A Figura 81 são apresentados os ensaios realizados no motor *HONDA* com uma velocidade aproximada de 2750 rpm variando os valores dos ângulos de AI.

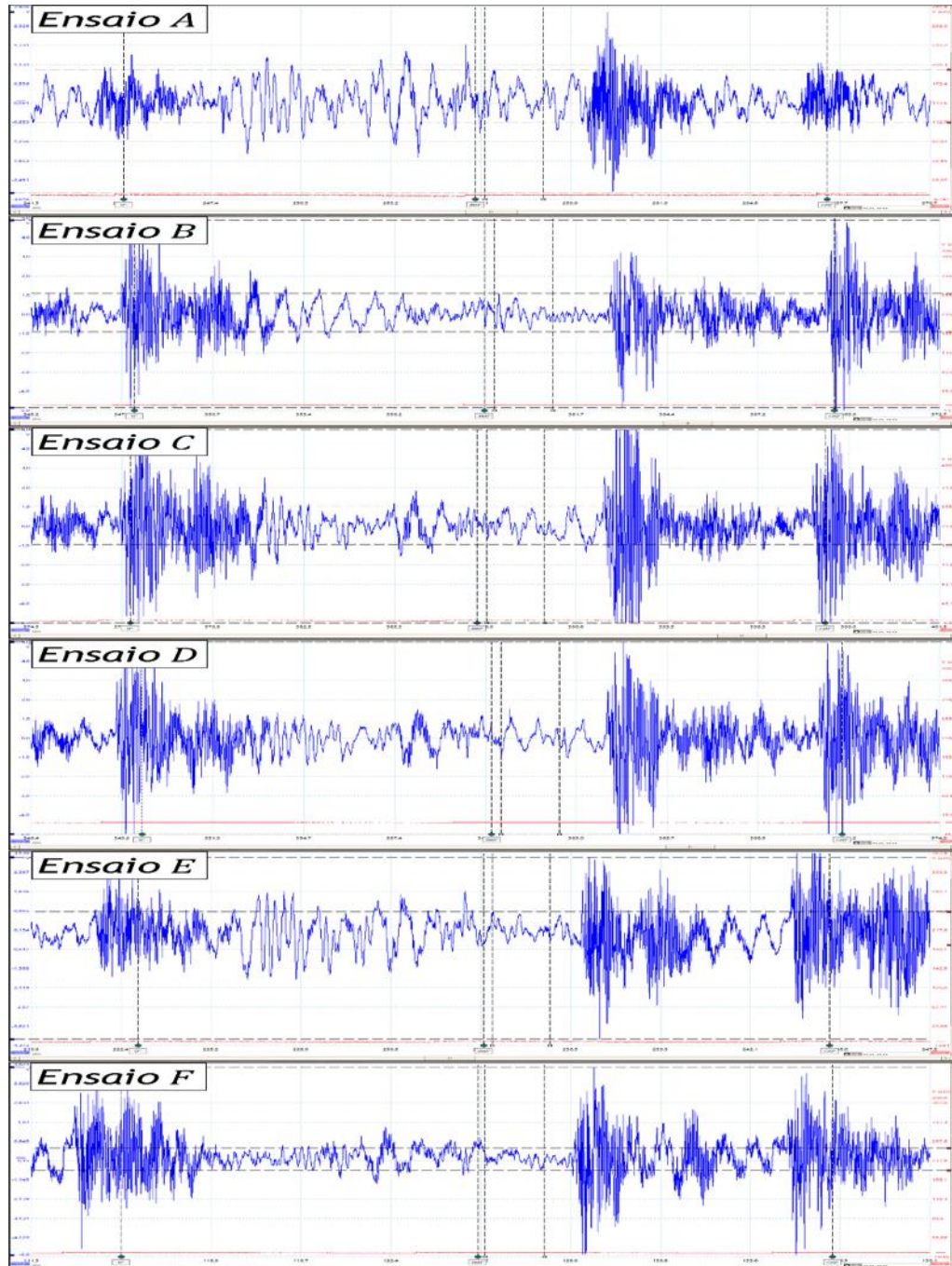


Figura 81 - Ensaios no motor *HONDA* a ≈ 2750 rpm.

Na Tabela 17 estão apresentados os valores da velocidade de rotação em cada ensaio, o intervalo de tempo de funcionamento do ciclo do motor, o valor da frequência referente ao período de funcionamento do motor, os valores da amplitude de vibração que foram detetados para cada um dos ensaios realizados, quer a amplitude de vibração do ciclo quer a amplitude de vibração registada na janela de combustão correspondente ao ciclo de funcionamento, bem como o ângulo de AI correspondente a cada ensaio.

Tabela 17 - Ensaios no motor HONDA a ≈ 2750 rpm.

Ensaio	Ângulo AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]
Ensaio A	10	2632	0,0228	43,9	5,60	0,0019	1,62
Ensaio B	20	2830	0,0212	47,2	9,66	0,0018	2,00
Ensaio C	30	2857	0,021	47,6	10,00	0,00175	1,99
Ensaio D	40	2830	0,0212	47,2	10,00	0,0018	2,47
Ensaio E	50	2765	0,0217	46,1	7,09	0,0018	1,29
Ensaio F	60	2727	0,0220	45,5	9,71	0,0019	1,16

Os valores da Tabela 17 são ensaios apresentados graficamente na Figura 81.

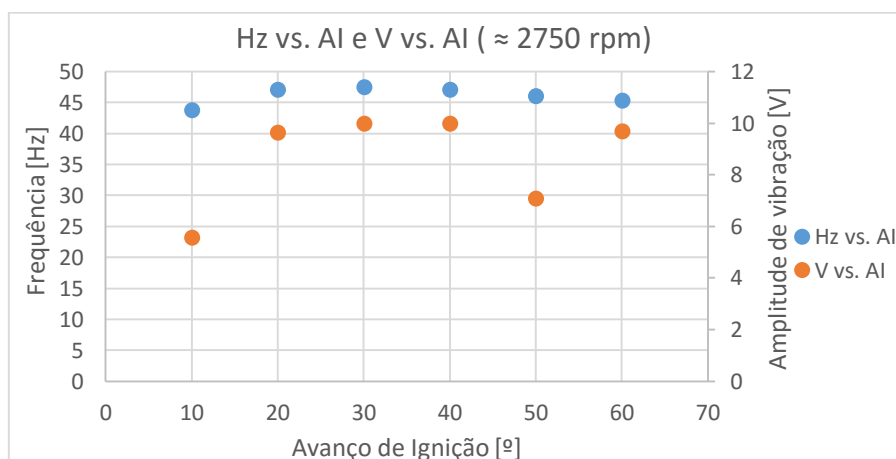


Figura 82 - Gráfico dos ensaios no motor HONDA a ≈ 2750 rpm.

Nestes ensaios com a velocidade 2750 rpm podemos observar uma grande oscilação nos sinais captados pelo sensor de detonação principalmente logo após a combustão. Estas oscilações podem dever-se às altas velocidades a que o motor estava a operar, fazendo notar-se a instabilidade do banco de ensaios, ficando desta maneira o motor sujeito também às vibrações sentidas no banco de ensaios. Nestes ensaios a 2750 rpm é possível verificar uma variação nos

Deteção de Detonação em Motores de Pistão

valores da amplitude de vibração, principalmente nos Ensaio A e Ensaio E. Podemos verificar ainda que a combustão ocorre depois da janela de combustão não existindo assim qualquer problema relativo a uma possível combustão anormal da mistura.

5. Conclusões

Esta dissertação tinha como objetivo detetar o aparecimento do fenómeno de detonação nos motores de combustão interna e analisar a forma como a detonação ocorre, de que maneira se manifesta, qual ou quais as condições e os regimes de trabalho mais propícios para que o fenómeno da detonação aconteça.

Na parte inicial desta dissertação foram expostas algumas considerações teóricas de modo a que fosse possível compreender o funcionamento de um motor alternativo de combustão interna e quais as fases de funcionamento que estão presentes neste tipos de motores, dando principal incidência à combustão e aos fenómenos de combustão anormal que se podem desenrolar durante o funcionamento do motor. Em seguida foram apresentados os equipamentos utilizados para realizar a parte experimental desta dissertação e quais os procedimentos para a realização dos ensaios experimentais.

Os primeiros ensaios realizados foram efetuados no motor *OPEL ASTRA 1.4i*, como descrito na parte da experiência laboratorial desta dissertação, podemos verificar que não existe nenhuma perturbação na amplitude de vibração do motor ao longo das várias velocidades de rotação em que este operou. É possível desta forma concluir que no motor *OPEL* não existe a possibilidade de ocorrer qualquer tipo de combustão anormal durante o seu normal funcionamento.

O motor *LOMBARDINI LDW 502* é um motor que funciona segundo o ciclo de Diesel, e como é referido na parte introdutória relativa à combustão anormal, a ocorrência de detonação neste tipo de motor é menos provável do que nos motores que funcionam segundo o ciclo de Otto, isto porque o diesel possui um IO elevado que a gasolina. Com recurso as Figuras 55 e 56 e a Tabela 5 podemos concluir que não existe nenhuma alteração significativa na variação da amplitude de vibração a medida que os valores da velocidade de rotação vão aumentando, tal como a forma da onda correspondente ao sinal captado pelo sensor de vibração vai permanecendo uniforme ao longo de todos os ensaios.

A parte experimental realizada no motor *HONDA GX 120* consistiu na realização de duas corridas ao longo das velocidades de rotação do motor, variando os ângulos de AI. Para a realização desta parte experimental usou-se como combustível gasolina 95, aplicou-se uma carga constante aplicada através do travão de mão instalado no motor. De maneira a ser possível observar e estabelecer algum tipo de comparação entre os vários ensaios foram estabelecidos dois tipos de análise: o primeiro consistiu na fixação do AI fazendo variar a velocidade de rotação do motor; o segundo na fixação da velocidade de rotação do motor e fazendo variar o AI do motor.

Na primeira análise, fixando o ângulo de AI e fazendo variar a velocidade do motor, podemos recorrer às Figuras 59 a 74 para concluir que o sinal de vibração relativo a combustão da mistura

se desloca do lado direito das Figuras para o lado esquerdo, aproximando-se assim do disparo da faísca. Tendo em conta as várias Figuras relativas aos vários AI testados podemos concluir que quando o motor se aproxima perto das 1400 *rpm* a vibração relacionada com o fenómeno de combustão se encontra perto do início da janela de combustão e à medida que os valores da velocidade de rotação vão baixando, a vibração associada à combustão vai-se aproximando do momento em que a faísca é acionada, distanciando-se desta maneira da janela de combustão. Este distanciamento da vibração associada a combustão acentua-se quando os ângulos de AI são superiores a 50°, aumentando desta maneira a possibilidade da detonação ser perceptível não só em termos de intensidade bem como temporalmente, sendo mais cedo, levando até que o motor parasse o seu normal funcionamento, como é o caso de quando o ângulo de AI é de 70° e de 75°

É possível concluir então que à medida que a velocidade do motor vai diminuindo e são atingidos valores de velocidade de rotação mais baixos, a ocorrência de algum dos três tipos de combustão anormal pode tornar-se real.

Da segunda análise realizada no motor *HONDA*, ver da Figura 75 à Figura 82 e da Tabela 14 até à Tabela 17, podemos verificar que à velocidade de funcionamento mais baixa (700 *rpm*) a forma de todas as ondas é muito semelhante em todos os ensaios realizados e que em todos os ensaios, a vibração correspondente ao fenómeno da combustão está fora da janela de combustão. Este fenómeno começa no início da janela quando o ângulo de AI é de 10° e vai-se aproximando da faísca à medida que o ângulo de AI vai aumentando. Estes factos levam a crer que é possível existir detonação no motor.

Na velocidade de 1400 *rpm*, podemos afirmar que a partir de um ângulo de AI de 50° a vibração correspondente ao fenómeno da combustão está fora ou quase fora da janela de combustão, o que pode levar à ocorrência de pré-ignição ou de detonação da mistura dentro do cilindro. Nos valores de velocidade mais elevados (2300 *rpm* e 2750 *rpm*), não se verifica a ocorrência de nenhum tipo de combustão anormal pois a vibração correspondente à combustão está toda depois da janela de combustão, pelo que não provoca qualquer tipo de anormalidades no ciclo de funcionamento do motor.

Tendo em conta as conclusões e os aspetos acima apresentados aconselha-se que o motor *HONDA GX 120* trabalhe num intervalo de ângulos de AI entre os 10° e os 50°, e que evite rotações inferiores às 1000 *rpm* quando trabalhar com ângulos de AI superiores 50°.

5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros a realizar seria de interesse, com a instalação do motor no novo banco de ensaios que está a ser contruído e com as afinações realizadas para o pleno funcionamento do motor, efetuar de novo a experiência para validar os resultados obtidos nesta dissertação de forma a evitar algumas flutuações na captura do sinal em algumas velocidades e evitar transferências de algumas vibrações do banco de ensaios para o motor. Seria interessante também introduzir no motor *HONDA* um sensor de pressão no cilindro de forma a ser possível comparar as ondas captadas por parte do sensor de detonação com as pressões sentidas no interior do cilindro do motor, de forma de confrontar e validar os resultados que foram obtidos nesta dissertação. É de interesse também, com os mesmos ângulos de AI, testar diferentes tipos de combustível, com o intuito de estudar a importância do IO na ocorrência da combustão anormal e qual o combustível que mais dificulta a ocorrência da combustão anormal. Para além disso, seria interessante também acrescentar a este estudo variações nos valores da estequiometria da mistura, de maneira a verificar qual a importância que este parâmetro da mistura tem na ocorrência da combustão anormal.

Bibliografia

- [1] Martins, J., *Motores de Combustão Interna*, Publindústria - Edições Técnicas, 2005.
- [2] “History of the internal combustion engine.” [Acedido em agosto de 2015]
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_internal_combustion_engine.
- [3] “Infopédia Dicionários Porto Editora” [Acedido em agosto de 2015]
<http://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/engenharia>.
- [4] Lima, F., Soares, I., Costa, M., Silva, N., Sousa, P., “Motores de Combustão Interna - Relatório Preliminar relativo à disciplina de Projecto FEUP”, FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, setembro e outubro de 2009.
- [5] “Motores a Pistão” [Acedido em outubro de 2015]
<http://aeronaves2014.blogspot.pt/p/motores-pistao.html>.
- [6] Gonçalves, R., “3D CFD Simulation of a Cold Flow Four-Stroke Opposed Piston Engine”, Universidade da Beira Interior, Covilhã, outubro de 2014, (Dissertação de Mestrado).
- [7] Silva, M., Apontamentos de Física II (Termodinâmica) (10352), Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica, Departamento de Ciências Aeroespaciais, Universidade da Beira Interior, Ano letivo de 2009-2010.
- [8] Brójo, F., Apontamentos de Propulsão de Aeronaves I (10363), Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica, Departamento de Ciências Aeroespaciais, Universidade da Beira Interior, Ano letivo de 2012-2013.
- [9] Brójo, F., Apontamentos de Turbulência e Combustão (10401), Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica, Departamento de Ciências Aeroespaciais, Universidade da Beira Interior, Ano letivo de 2014-2015.
- [10] “Máquinas Térmicas I - Prof. Eduardo Loureiro” [Acedido em setembro de 2015]
http://www.eduloureiro.com.br/index_arquivos/MTAula1.pdf.
- [11] Manavella, H. J., “DIAGNÓSTICO AUTOMOTIVO AVANÇADO - Injeção/Ignição Eletrônica”, HM Autotrônica, Capítulo 3- Combustão e Emissões.
- [12] Barata, J. M. M., “Propulsão Motores Alternativos de Combustão Interna”, Volume 3, Universidade da Beira Interior, Covilhã, setembro 2011.
- [13] Puzinauskas, P. V., “Examination of Methods used to Characterize Engine Knock”, SAE Technical Paper Series, Paper N°. 920808, Detroit, Michigan, 2002.
- [14] Heywood, J. B., “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill, Inc, 1988.

- [15] Lowe, D. P., Lin, T. R., Wu, W. e Tan, A. C. C., “*Diesel Knock Combustion and its Detection Using Acoustic Emission*”, Acoustic Emission Group, 2011.
- [16] “*Engine Failure*” [Acedido em outubro de 2015]
<http://www.aa1car.com/library/us697.htm>.
- [17] Livengood, J. C. e Wu, P. C., “*Correlation of Autoignition Phenomenon in Internal Combustion Engine and Rapid Compression Machines*”, Proceedings of the Fifth Internaton Symposium on Combustion, Reinhold, 1995.
- [18] Douad, A. M. e Eyzat, P., “*Four-Octane-Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of Fuel and Engines*”, SAE Technical Paper Series, Paper N°. 780080, 1978.
- [19] “*Sensores de detonação - Técnico de Injeção Eletrônica Xavier de Flávio Xavier Cursos*” [Acedido em abril de 2015]
<http://www.flaviocursos.com.br/dicas/Sensores%20de%20detona%E7%E3o.pdf>.
- [20] Lucchesi, D., “*O Automóvel - Curso Técnico Volume 1*”, Editorial Presença, 1989.
- [21] “*Câmara de Combustão Hemisférica*” [Acedido em agosto de 2015]
<http://automotoresv8.blogspot.pt/2014/01/motores-hemi.html>.
- [22] Torres, J. T., “*Motores de Combustão Interna - Aplicação na Propulsão Aeronáutica - Uma Introdução*”, Instituto Superior Técnico, Abril de 2005.
- [23] “*Sensores de Detonação*” [Acedido em agosto de 2015]
<http://www.ngkntk.com.br/automotivo/en/sensor-de-detonacao>.
- [24] Catálogo “*Test Thomson*”, MTE-Thomson, Sensores de Detonação, pág. 10.
- [25] BOSCH, “*Gasoline-engine management*”, 1st Edition, Robert Bosch GmbH, 1999.
- [26] Horner, J.B., “*Engine Knock Detection Using Spectal Analysis Techiques With a TMS320 DSP*”, Texas Instruments Application Report SPRA039, U.S.A., 1995.
- [27] Fernandez, B. O., “*Considerações sobre a outros empregos do Sensor de Detonação para o Controle Eletrônico de Motores Ciclo de Otto Utilizando Análise Espectral*”, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006, (Dissertação de Mestrado).
- [28] “*Motor OPEL ASTRA 1.4i*” [Acedido em julho de 2015]
<http://www.carfolio.com/specifications/models/car/?car=23408>.
- [29] Lombardini Service, “*Manuale di Officina - Motori Serie FOCS*”.
- [30] Honda, “*Motores Estacionários GX 120/160/200 - Manual do Proprietário*”.
- [31] Haltech - Engine Management Systems, “*Haltech E6H/E6M Manual*”.
- [32] Pico Technology, “*PicoScope 6 - PC Oscilloscope Software User’s Guide*”.

- [33] Fernandes, L., “*Otimização do Sistema de Injeção Eletrónica de Um Motor de Combustão Interna*”, Universidade da Beira Interior, Covilhã, outubro de 2015, (Dissertação de Mestrado).
- [34] Navio, F., “*Previsão do desempenho de motores alternativos com ignição por faísca*”, Universidade da Beira Interior, Covilhã, outubro de 2011, (Dissertação de Mestrado).

Anexo A - Motores Utilizados

Anexo A1 - OPEL ASTRA 1.4i [26]

Tabela 18 - Características do motor OPEL ASTRA 1.4i.

OPEL ASTRA 1.4i		
Cilindro	N°	4
Diâmetro do pistão	mm	77.6
Curso	mm	62
Cilindrada	cm^3	505
Razão de compressão		22,8:1
Potência	N 80/1269/CEE-ISO 1585-DIN 70020 (KW)	9.8(13.4)
	NA ISO 3046 - 1 ICXN - DIN 6270 (KW)	8.2(11.2)
Binário máximo	$N \cdot m$	103
	RPM	2800
Consumo específico	g/KWh	326
Consumo de óleo	Kg/h	0,007
Peso vazio	Kg	60
Volume de ar a 3600 RPM	$l./1'$	910
Volume de ar de arrefecimento a 3600 RPM	m^3/mm	36
Carga axial admissível	Kg	300
Inclinação máxima	Serviço descontinuo durante um ciclo de 1 min (α)	35°
	Serviço contínuo por 30 min (α)	25°

Anexo A2 - LOMBARDINI LDW 502

Tabela 19 - Características do motor LOMBARDINI LDW 502.

LOMBARDINI LDW 502		
Cilindro	Nº	2
Diâmetro do pistão	mm	72
Curso	mm	62
Cilindrada	cm ³	505
Razão de compressão		22,8:1
Potência	N 80/1269/CEE-ISO 1585-DIN 70020 (KW)	9,8(13,4)
	NA ISO 3046 - 1 ICXN - DIN 6270 (KW)	8,2(11,2)
Binário máximo	N · m	28,7
	RPM	2400
Consumo específico	g/KWh	326
Consumo de óleo	Kg/h	0,007
Peso vazio	Kg	60
Volume de ar a 3600 RPM	l./1'	910
Volume de ar de arrefecimento a 3600 RPM	m ³ /mm	36
Carga axial admissível	Kg	300
Inclinação máxima	Serviço descontínuo durante um ciclo de 1 min (α)	35°
	Serviço contínuo por 30 min (α)	25°

Anexo A3 - HONDA GX 120

Tabela 20 - Características do motor HONDA GX 120.

HONDA GX 120		
Cilindro	N°	1
Diâmetro do pistão	mm	60
Curso	mm	42
Cilindrada	cm^3	118
Razão de compressão		8,5:1
Potência	KW	2,6 (3500 RPM)
Binário máximo	$N \cdot m$	7,3
	RPM	2500
Consumo	g/KWh	313
Peso vazio	Kg	13
Sistema de arrefecimento		Ar forçado
Sistema de distribuição de combustível		Carburador
Válvulas		
Diâmetro Admissão	cm	2,2
Diâmetro porta de escape	cm	1,9
Diâmetro escape	cm	1,8
Diâmetro porta admissão	cm	1,7

Anexo B - Mapa de injeção

Tabela 21 - Mapa de injeção do motor HONDA GX 120.

Tempo injeção	0 [rpm]	500 [rpm]	1000 [rpm]	2000 [rpm]	3000 [rpm]	4000 [rpm]	5000 [rpm]	6000 [rpm]
1 [ms]	2,948	2,948	3,336	4,128	3,872	3,100	2,656	2,191
2 [ms]	2,966	2,966	3,340	4,101	3,859	3,122	2,693	2,244
3 [ms]	2,983	2,983	3,342	4,073	3,845	3,129	2,713	2,278
4 [ms]	2,998	2,998	3,343	4,045	3,830	3,116	2,711	2,287
5 [ms]	3,013	3,013	3,343	4,016	3,815	3,129	2,737	2,328
6 [ms]	3,025	3,025	3,341	3,988	3,799	3,125	2,744	2,348
7 [ms]	3,037	3,037	3,338	3,959	3,781	3,127	2,758	2,374
8 [ms]	3,046	3,046	3,334	3,930	3,763	3,128	2,771	2,400
9 [ms]	3,055	3,055	3,328	3,900	3,744	3,136	2,791	2,433
10 [ms]	3,062	3,062	3,320	3,871	3,725	3,126	2,791	2,444
11 [ms]	3,068	3,068	3,311	3,841	3,704	3,119	2,795	2,459
12 [ms]	3,072	3,072	3,301	3,811	3,683	3,115	2,801	2,477
13 [ms]	3,075	3,075	3,290	3,780	3,660	3,114	2,811	2,498
14 [ms]	3,076	3,076	3,277	3,750	3,637	3,098	2,804	2,501
15 [ms]	3,076	3,076	3,262	3,719	3,613	3,106	2,823	2,533
16 [ms]	3,075	3,075	3,246	3,687	3,588	3,096	2,823	2,542
17 [ms]	3,072	3,072	3,229	3,656	3,563	3,089	2,826	2,555
18 [ms]	3,068	3,068	3,210	3,624	3,536	3,065	2,809	2,547
19 [ms]	3,062	3,062	3,190	3,592	3,509	3,067	2,821	2,570
20 [ms]	3,055	3,055	3,169	3,560	3,480	3,049	2,811	2,569
21 [ms]	3,047	3,047	3,146	3,528	3,451	3,036	2,807	2,573
22 [ms]	3,037	3,037	3,122	3,495	3,421	3,007	2,783	2,557
23 [ms]	3,026	3,026	3,096	3,462	3,391	3,003	2,789	2,571
24 [ms]	3,013	3,013	3,069	3,428	3,359	2,979	2,771	2,562
25 [ms]	2,999	2,999	3,040	3,395	3,326	2,961	2,760	2,558
26 [ms]	2,983	2,983	3,010	3,361	3,293	2,945	2,752	2,558
27 [ms]	2,967	2,967	2,979	3,327	3,259	2,913	2,725	2,537
28 [ms]	2,958	2,958	2,971	3,305	3,249	2,906	2,722	2,537
29 [ms]	2,952	2,952	2,968	3,298	3,242	2,900	2,718	2,535
30 [ms]	2,952	2,952	2,941	3,246	3,209	2,902	2,734	2,565
31 [ms]	2,952	2,952	2,941	3,246	3,209	2,902	2,734	2,565
32 [ms]	2,952	2,952	2,941	3,246	3,209	2,902	2,734	2,565

Anexo C -

Anexo C1 - Tabela Ensaaios Realizados no Motor OPEL ASTRA 1.4i

Tabela 22 - Tabela dos ensaios realizados no Motor OPEL ASTRA 1.4i.

Ensaio	Rotação [<i>rpm</i>]	Funcionamento do Ciclo [<i>s</i>]	Frequência [<i>Hz</i>]	Amplitude Vibração do Ciclo [<i>V</i>]
Ensaio A	689	0,0873	11,5	0,60
Ensaio B	1131	0,0530	18,8	0,61
Ensaio C	1571	0,0368	26,2	0,53
Ensaio D	1897	0,0325	31,6	0,66
Ensaio E	3083	0,0195	51,4	1,38
Ensaio F	4240	0,0141	70,7	2,32
Ensaio G	5103	0,0118	85,0	4,49
Ensaio H	6123	0,0098	102,0	6,30
Ensaio I	1003	0,0598	16,7	0,61
Ensaio J	1379	0,0435	23,0	0,62
Ensaio K	3083	0,0195	51,4	1,38
Ensaio L	3525	0,0170	58,7	1,63
Ensaio M	4562	0,0132	76,0	3,28
Ensaio N	5718	0,0105	95,3	5,13

Anexo C2 - Tabela Ensaios Realizados no Motor LOMBARDINI LDW 502

Tabela 23 - Tabela dos ensaios realizados no motor LOMBARDINI LDW 502.

Ensaio	Rotação [<i>rpm</i>]	Funcionamento do Ciclo [<i>s</i>]	Frequência [<i>Hz</i>]	Amplitude Vibração no Ciclo [<i>V</i>]
Ensaio A	480	0,1251	8,0	0,30
Ensaio B	637	0,0941	10,6	0,46
Ensaio C	827	0,0737	13,8	0,45
Ensaio D	1015	0,0591	16,9	0,71
Ensaio E	1229	0,0489	20,5	0,75
Ensaio F	1361	0,0441	22,7	0,71
Ensaio G	1488	0,0403	24,8	2,30
Ensaio H	1588	0,0378	26,5	1,15
Ensaio I	568	0,0795	9,5	0,38
Ensaio J	760	0,0613	12,7	0,41
Ensaio K	980	0,1237	16,3	0,69
Ensaio L	487	0,1002	8,1	0,29
Ensaio M	599	0,0882	10,0	0,41
Ensaio N	679	0,0764	11,3	0,44
Ensaio O	793	0,0452	13,2	0,47
Ensaio P	1347	0,0429	22,40	0,70
Ensaio Q	1434	0,0381	23,9	1,65
Ensaio R	1564	0,1062	26,1	2,33

Anexo C3 - Tabela Ensaios Realizados no Motor HONDA GX 120

Tabela 24 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 75°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2214	0,0271	36,9	4,78	0,002	4,04	0,4228	0,4364	0,4499	0,4387	0,4256	0,4477	0,4327
Ensaio B	2192	0,0274	36,5	4,04	0,002	4,04	0,0397	0,0534	0,0671	0,0558	0,0425	0,0648	0,0497
Ensaio C	2128	0,0282	35,5	5,07	0,002	5,07	0,1337	0,1478	0,1619	0,1503	0,1366	0,1596	0,1440
Ensaio D	2212	0,0271	36,9	4,45	0,002	4,38	0,0671	0,0806	0,0942	0,0830	0,0698	0,0919	0,0770
Ensaio E	2190	0,0274	36,5	5,16	0,002	4,69	0,4185	0,4322	0,4459	0,4346	0,4212	0,4436	0,4285
Ensaio F	2174	0,0276	36,2	4,42	0,002	4,36	0,3141	0,3279	0,3417	0,3303	0,3169	0,3394	0,3242
Ensaio G	2166	0,0277	36,1	4,30	0,002	4,30	0,2140	0,2278	0,2417	0,2303	0,2168	0,2394	0,2241
Ensaio H	2151	0,0279	35,8	3,37	0,002	3,37	0,2308	0,2448	0,2587	0,2472	0,2336	0,2564	0,2410

Tabela 25 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 70°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2239	0,0268	37,3	4,75	0,002	4,75	0,3160	0,3294	0,3428	0,3318	0,3187	0,3406	0,3258
Ensaio B	2198	0,0273	36,6	4,58	0,002	4,18	0,2331	0,2467	0,2604	0,2491	0,2358	0,2581	0,2430
Ensaio C	2091	0,0287	34,8	5,16	0,002	5,16	0,3918	0,4061	0,4205	0,4087	0,3947	0,4181	0,4023
Ensaio D	1917	0,0313	31,9	3,45	0,003	3,31	0,4626	0,4783	0,4939	0,4810	0,4658	0,4913	0,4741
Ensaio E	2206	0,0272	36,8	3,83	0,002	3,83	0,3078	0,3214	0,3350	0,3238	0,3106	0,3328	0,3178
Ensaio F	2167	0,0277	36,1	4,29	0,002	4,29	0,0092	0,0231	0,0369	0,0255	0,0120	0,0346	0,0193
Ensaio G	2105	0,0285	35,1	5,17	0,002	4,89	0,3633	0,3775	0,3918	0,3800	0,3662	0,3894	0,3737
Ensaio H	2042	0,0294	34,0	4,81	0,002	4,81	0,0329	0,0476	0,0623	0,0502	0,0359	0,0598	0,0436

Tabela 26 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 60°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2727	0,0220	45,5	9,71	0,0018	1,16	0,1141	0,1251	0,1361	0,1271	0,1164	0,1343	0,1222
Ensaio B	2632	0,0228	43,9	4,94	0,0019	1,87	0,2992	0,3106	0,3220	0,3126	0,3015	0,3201	0,3075
Ensaio C	2469	0,0243	41,2	4,16	0,0020	1,73	0,2755	0,2877	0,2998	0,2898	0,2780	0,2978	0,2844
Ensaio D	2135	0,0281	35,6	4,39	0,0024	4,39	0,2401	0,2542	0,2682	0,2567	0,2430	0,2659	0,2504
Ensaio E	1840	0,0326	30,7	3,56	0,0027	3,56	0,2959	0,3122	0,3285	0,3151	0,2992	0,3258	0,3078
Ensaio F	1395	0,0430	23,3	2,29	0,0036	2,29	0,3856	0,4071	0,4286	0,4108	0,3899	0,4250	0,4013
Ensaio G	1029	0,0583	17,2	2,22	0,0049	0,90	0,2218	0,2509	0,2801	0,2560	0,2277	0,2752	0,2431
Ensaio H	673	0,0892	11,2	1,76	0,0075	0,32	0,3573	0,4019	0,4465	0,4097	0,3664	0,4391	0,3899
Ensaio I	2597	0,0231	43,3	5,07	0,0019	2,04	0,3642	0,3758	0,3873	0,3778	0,3666	0,3854	0,3727
Ensaio J	2521	0,0238	42,0	4,40	0,0020	2,45	0,3259	0,3378	0,3497	0,3399	0,3283	0,3477	0,3346
Ensaio K	2392	0,0251	39,9	5,77	0,0021	2,19	0,0633	0,0758	0,0884	0,0780	0,0658	0,0863	0,0725
Ensaio L	2214	0,0271	36,9	4,58	0,0023	4,48	0,3579	0,3714	0,3850	0,3738	0,3606	0,3827	0,3678
Ensaio M	2198	0,0273	36,6	4,08	0,0023	3,97	0,2170	0,2306	0,2443	0,2330	0,2197	0,2420	0,2269
Ensaio N	2174	0,0276	36,2	4,07	0,0023	4,07	0,1438	0,1576	0,1714	0,1600	0,1466	0,1691	0,1539
Ensaio O	1290	0,0465	21,5	2,91	0,0039	2,68	0,1524	0,1756	0,1989	0,1797	0,1571	0,1950	0,1694
Ensaio P	821	0,0731	13,7	1,80	0,0061	0,51	0,1969	0,2334	0,2700	0,2398	0,2043	0,2639	0,2236

Tabela 27 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 50°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2765	0,0217	46,1	7,09	0,0018	1,29	0,2229	0,2338	0,2446	0,2357	0,2251	0,2428	0,2308
Ensaio B	2521	0,0238	42,0	4,559	0,0020	1,91	0,2454	0,2573	0,2692	0,2593	0,2478	0,2672	0,2540
Ensaio C	2381	0,0252	39,7	6,21	0,0021	2,07	0,3387	0,3513	0,3639	0,3535	0,3412	0,3618	0,3479
Ensaio D	2055	0,0292	34,2	3,36	0,0024	3,36	0,2538	0,2684	0,2830	0,2710	0,2568	0,2806	0,2645
Ensaio E	1734	0,0346	28,9	3,16	0,0029	3,16	0,2661	0,2834	0,3007	0,2864	0,2696	0,2978	0,2787
Ensaio F	1075	0,0558	17,9	2,57	0,0047	1,36	0,1117	0,1396	0,1675	0,1445	0,1173	0,1628	0,1321
Ensaio G	932	0,0644	15,5	1,87	0,0053	0,80	0,2732	0,3054	0,3376	0,3110	0,2797	0,3322	0,2967
Ensaio H	673	0,0891	11,2	1,22	0,0072	0,51	0,2752	0,3197	0,3643	0,3275	0,2842	0,3569	0,3077
Ensaio I	2691	0,0223	44,8	5,04	0,0019	1,22	0,3255	0,3367	0,3478	0,3386	0,3278	0,3460	0,3337
Ensaio J	2174	0,0276	36,2	5,31	0,0023	4,11	0,0439	0,0577	0,0715	0,0601	0,0467	0,0692	0,0539
Ensaio K	1875	0,0320	31,3	3,34	0,0027	3,34	0,2337	0,2497	0,2657	0,2525	0,2370	0,2631	0,2454
Ensaio L	1807	0,0332	30,1	4,27	0,0028	4,27	0,1736	0,1902	0,2068	0,1931	0,1770	0,2040	0,1857
Ensaio M	1007	0,0596	16,8	2,47	0,0050	0,95	0,1912	0,2210	0,2508	0,2263	0,1973	0,2459	0,2130
Ensaio N	698	0,0860	11,6	1,73	0,0072	0,48	0,2121	0,2551	0,2981	0,2626	0,2208	0,2909	0,2435

Tabela 28 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 40°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2830	0,0212	47,2	10,00	0,0018	2,47	0,3498	0,3604	0,3710	0,3622	0,3519	0,3692	0,3575
Ensaio B	2667	0,0225	44,4	5,17	0,0019	1,40	0,3256	0,3368	0,3481	0,3388	0,3278	0,3462	0,3338
Ensaio C	2429	0,0247	40,5	6,43	0,0021	2,08	0,2114	0,2237	0,2361	0,2259	0,2139	0,2340	0,2204
Ensaio D	2128	0,0282	35,5	4,33	0,0024	2,58	0,2961	0,3102	0,3243	0,3126	0,2989	0,3219	0,3064
Ensaio E	1600	0,0375	26,7	2,72	0,0031	2,72	0,1379	0,1566	0,1754	0,1599	0,1417	0,1723	0,1516
Ensaio F	1361	0,0441	22,7	2,86	0,0037	2,86	0,2565	0,2785	0,3006	0,2824	0,2609	0,2969	0,2726
Ensaio G	1261	0,0476	21,0	2,36	0,0039	2,36	0,1198	0,1436	0,1674	0,1478	0,1247	0,1635	0,1372
Ensaio H	656	0,0914	10,9	1,75	0,0075	0,40	0,2716	0,3173	0,3630	0,3253	0,2808	0,3554	0,3050
Ensaio I	2715	0,0221	45,2	5,26	0,0018	1,55	0,2654	0,2765	0,2875	0,2784	0,2677	0,2857	0,2735
Ensaio J	2532	0,0237	42,2	5,10	0,0020	1,39	0,3403	0,3522	0,3640	0,3542	0,3427	0,3620	0,3490
Ensaio K	2206	0,0272	36,8	4,18	0,0023	3,09	0,2561	0,2697	0,2833	0,2721	0,2589	0,2810	0,2660
Ensaio L	1504	0,0399	25,1	3,24	0,0033	3,24	0,3194	0,3394	0,3593	0,3429	0,3235	0,3560	0,3340

Tabela 29 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 30°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2857	0,0210	47,6	10,00	0,0018	1,99	0,3767	0,3878	0,3983	0,3890	0,3788	0,3960	0,3844
Ensaio B	2667	0,0225	44,4	4,67	0,0019	1,02	0,2050	0,2169	0,2281	0,2182	0,2073	0,2256	0,2132
Ensaio C	2532	0,0237	42,2	5,02	0,0020	1,73	0,2369	0,2494	0,2613	0,2509	0,2393	0,2587	0,2456
Ensaio D	2214	0,0271	36,9	4,54	0,0023	1,48	0,1390	0,1533	0,1668	0,1549	0,1417	0,1638	0,1489
Ensaio E	1858	0,0323	31,0	2,87	0,0027	2,81	0,3883	0,4045	0,4206	0,4073	0,3916	0,4180	0,4001
Ensaio F	1660	0,0362	27,7	2,93	0,0030	2,93	0,0875	0,1055	0,1236	0,1087	0,0911	0,1206	0,1007
Ensaio G	1442	0,0416	24,0	3,32	0,0035	3,32	0,3133	0,3352	0,3560	0,3377	0,3175	0,3514	0,3285
Ensaio H	638	0,0940	10,6	1,51	0,0077	0,55	0,1548	0,2044	0,2514	0,2101	0,1644	0,2410	0,1892
Ensaio I	2174	0,0276	36,2	4,00	0,0023	1,91	0,3165	0,3311	0,3449	0,3327	0,3193	0,3418	0,3266
Ensaio J	711	0,0844	11,8	1,76	0,0071	0,42	0,1332	0,1777	0,2199	0,1828	0,1418	0,2106	0,1640

Tabela 30 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 20°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2830	0,0212	47,2	9,66	0,0018	2,000	0,3483	0,3589	0,3695	0,3607	0,3504	0,3677	0,3560
Ensaio B	2679	0,0224	44,6	4,91	0,0019	1,654	0,2817	0,2929	0,3041	0,2949	0,2840	0,3023	0,2899
Ensaio C	2372	0,0253	39,5	4,15	0,0021	1,973	0,2497	0,2624	0,2750	0,2646	0,2523	0,2729	0,2589
Ensaio D	2041	0,0294	34,0	4,30	0,0025	4,145	0,3744	0,3891	0,4038	0,3917	0,3774	0,4014	0,3852
Ensaio E	1749	0,0343	29,1	2,94	0,0029	2,937	0,0794	0,0966	0,1137	0,0996	0,0829	0,1109	0,0920
Ensaio F	1485	0,0404	24,8	2,69	0,0034	2,688	0,2763	0,2965	0,3167	0,3001	0,2804	0,3134	0,2911
Ensaio G	1198	0,0501	20,0	2,46	0,0042	2,461	0,2931	0,3181	0,3432	0,3225	0,2982	0,3390	0,3114
Ensaio H	670	0,0895	11,2	1,97	0,0073	0,312	0,2246	0,2693	0,3141	0,2772	0,2337	0,3066	0,2573
Ensaio I	2765	0,0217	46,1	6,46	0,0018	1,764	0,3445	0,3554	0,3662	0,3573	0,3467	0,3644	0,3524
Ensaio J	2679	0,0224	44,6	5,96	0,0019	1,464	0,3561	0,3673	0,3785	0,3693	0,3584	0,3767	0,3643
Ensaio K	2246	0,0267	37,4	4,84	0,0022	1,727	0,0352	0,0485	0,0619	0,0509	0,0379	0,0597	0,0449
Ensaio L	1064	0,0564	17,7	1,77	0,0047	1,768	0,1787	0,2069	0,2351	0,2118	0,1844	0,2304	0,1993
Ensaio M	723	0,0830	12,0	2,18	0,0068	0,532	0,1153	0,1568	0,1983	0,1640	0,1237	0,1913	0,1456

Tabela 31 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 com AI 10°.

Ensaio	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	2632	0,0228	43,9	5,60	0,0019	1,62	0,2445	0,2559	0,2673	0,2579	0,2468	0,2654	0,2528
Ensaio B	2400	0,0250	40,0	4,85	0,0021	1,98	0,2277	0,2402	0,2527	0,2424	0,2303	0,2507	0,2369
Ensaio C	2214	0,0271	36,9	4,55	0,0023	1,27	0,2188	0,2323	0,2459	0,2347	0,2215	0,2436	0,2287
Ensaio D	1948	0,0308	32,5	3,69	0,0026	1,89	0,1819	0,1973	0,2127	0,2000	0,1851	0,2102	0,1932
Ensaio E	1690	0,0355	28,2	3,74	0,0030	3,74	0,2916	0,3093	0,3271	0,3124	0,2952	0,3241	0,3045
Ensaio F	1485	0,0404	24,8	2,40	0,0034	2,40	0,2680	0,2882	0,3084	0,2917	0,2721	0,3050	0,2827
Ensaio G	1130	0,0531	18,8	2,17	0,0044	2,17	0,1560	0,1826	0,2091	0,1872	0,1614	0,2047	0,1754
Ensaio H	904	0,0664	15,1	1,95	0,0055	1,95	0,4200	0,4532	0,4864	0,4590	0,4268	0,4809	0,4443
Ensaio I	2174	0,0276	36,2	4,09	0,0023	0,90	0,3246	0,3384	0,3522	0,3408	0,3274	0,3499	0,3347
Ensaio J	2166	0,0277	36,1	4,59	0,0023	2,87	0,4088	0,4226	0,4365	0,4250	0,4116	0,4341	0,4189
Ensaio K	2135	0,0281	35,6	3,97	0,0024	1,85	0,2822	0,2962	0,3103	0,2987	0,2850	0,3079	0,2925
Ensaio L	1544	0,0389	25,7	2,70	0,0032	2,70	0,1001	0,1195	0,1389	0,1229	0,1040	0,1357	0,1143
Ensaio M	1351	0,0444	22,5	3,25	0,0037	3,25	0,1928	0,2150	0,2372	0,2188	0,1973	0,2335	0,2090

Detecção de Detonação em Motores de Pistão

Tabela 32 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a ≈ 700 rpm.

Ensaio	AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	10	904	0,0664	15,1	1,95	0,0055	1,95	0,4200	0,4532	0,4864	0,4590	0,4268	0,4809	0,4443
Ensaio B	20	670	0,0895	11,2	1,97	0,0073	0,31	0,2246	0,2693	0,3141	0,2772	0,2337	0,3066	0,2573
Ensaio C	30	638	0,0940	10,6	1,51	0,0077	0,55	0,1548	0,2044	0,2514	0,2101	0,1644	0,2410	0,1892
Ensaio D	40	656	0,0914	10,9	1,75	0,0075	0,40	0,2716	0,3173	0,3630	0,3253	0,2808	0,3554	0,3050
Ensaio E	50	673	0,0891	11,2	1,22	0,0072	0,51	0,2752	0,3197	0,3643	0,3275	0,2842	0,3569	0,3077
Ensaio F	60	673	0,0892	11,2	1,76	0,0075	0,32	0,3573	0,4019	0,4465	0,4097	0,3664	0,4391	0,3899

Tabela 33 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a ≈ 1400 rpm.

Ensaio	AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	10	1485	0,0404	24,8	2,40	0,0034	2,40	0,2680	0,2882	0,3084	0,2917	0,2721	0,3050	0,2827
Ensaio B	20	1485	0,0404	24,8	2,69	0,0034	2,69	0,2763	0,2965	0,3167	0,3001	0,2804	0,3134	0,2911
Ensaio C	30	1660	0,0362	27,7	2,93	0,0030	2,93	0,0875	0,1055	0,1236	0,1087	0,0911	0,1206	0,1007
Ensaio D	40	1361	0,0441	22,7	2,86	0,0037	2,86	0,2565	0,2785	0,3006	0,2824	0,2609	0,2969	0,2726
Ensaio E	50	1075	0,0558	17,9	2,57	0,0047	1,36	0,1117	0,1396	0,1675	0,1445	0,1173	0,1628	0,1321
Ensaio F	60	1395	0,0430	23,3	2,29	0,0036	2,29	0,3856	0,4071	0,4286	0,4108	0,3899	0,4250	0,4013

Tabela 34 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a ≈ 2300 rpm.

Ensaio	AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	10	2214	0,0271	36,9	4,55	0,0023	1,27	0,2188	0,2323	0,2459	0,2347	0,2215	0,2436	0,2287
Ensaio B	20	2372	0,0253	39,5	4,15	0,0021	1,97	0,2497	0,2624	0,2750	0,2646	0,2523	0,2729	0,2589
Ensaio C	30	2214	0,0271	36,9	4,54	0,0023	1,48	0,1390	0,1533	0,1668	0,1549	0,1417	0,1638	0,1489
Ensaio D	40	2429	0,0247	40,5	6,43	0,0021	2,08	0,2114	0,2237	0,2361	0,2259	0,2139	0,2340	0,2204
Ensaio E	50	2381	0,0252	39,7	6,21	0,0021	2,07	0,3387	0,3513	0,3639	0,3535	0,3412	0,3618	0,3479
Ensaio F	60	2135	0,0281	35,6	4,39	0,0024	4,39	0,2401	0,2542	0,2682	0,2567	0,2430	0,2659	0,2504
Ensaio G	70	2239	0,0268	37,3	4,75	0,0022	4,75	0,3160	0,3294	0,3428	0,3318	0,3187	0,3406	0,3258
Ensaio H	75	2214	0,0271	36,9	4,78	0,0023	4,04	0,4228	0,4364	0,4499	0,4387	0,4256	0,4477	0,4327

Tabela 35 - Tabela dos ensaios realizados no motor HONDA GX 120 a ≈ 2750 rpm.

Ensaio	AI [°]	Rotação [rpm]	Funcionamento do Ciclo [s]	Frequência [Hz]	Amplitude Vibração no Ciclo [V]	Janela de Combustão [s]	Amplitude Vibração na Janela [V]	PMS 1 [s]	PMS 2 [s]	PMS 3 [s]	AVE [s]	FVE [s]	AVA [s]	FVA [s]
Ensaio A	10	2632	0,0228	43,9	5,60	0,0019	1,62	0,2445	0,2559	0,2673	0,2579	0,2468	0,2654	0,2528
Ensaio B	20	2830	0,0212	47,2	9,66	0,0018	2,00	0,3483	0,3589	0,3695	0,3607	0,3504	0,3677	0,3560
Ensaio C	30	2857	0,0210	47,6	10,00	0,0018	1,99	0,3767	0,3878	0,3983	0,3890	0,3788	0,3960	0,3844
Ensaio D	40	2830	0,0212	47,2	10,00	0,0018	2,47	0,3498	0,3604	0,3710	0,3622	0,3519	0,3692	0,3575
Ensaio E	50	2765	0,0217	46,1	7,09	0,0018	1,29	0,2229	0,2338	0,2446	0,2357	0,2251	0,2428	0,2308
Ensaio F	60	2727	0,0220	45,5	9,71	0,0018	1,16	0,1141	0,1251	0,1361	0,1271	0,1164	0,1343	0,1222

